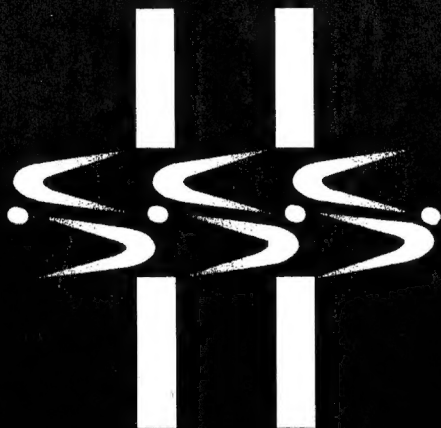


التداخل الضوئي والألياف



تأليف

الدكتور / أحمد أمين حمزة

الدكتور / نايل بركات



اهداءات ١٩٩٤
دار النشر للجامعات المصرية
الاسكندرية

التداخل الضوئي والألياف

* حقوق النشر :

English Edition :-

Interferometry of Fibrous Materials
by N. Barakat / A. A. Hamza
The Institute of Physics
I.O.P Publishing U.K.

- الطبعة الأجنبية

All rights reserved. No. part of this book may be reproduced or transmitted in any form, or by any means, electronic mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without prior written permission from the publisher.

Arabic Edition :-

- الطبعة العربية

التداخل الضوئي والألياف

د. نائل بركات - د. أحمد أمين حمزه

جميع حقوق الطبع والنشر محفوظة للناشران :

* I.O.P Publishing

* دار النشر للجامعات المصرية

Techno House, Redcliffe way

٤١ ش شريف - القاهرة

Bristol BS1 6NX England

ت : ٣٩٣٤٦٠٦ - ٣٩٣١٢٣٤

لايجوز نشر أى جزء من هذا الكتاب أو اختزال مادته بنظام استرجاع المعلومات أو نقله على أى وجه أو بأى طريقة ، سواء كانت إلكترونية ، أو ميكانيكية ، أو بالتصوير أو بالتسجيل ، أو خلاف ذلك إلا بعد الحصول على موافقة كتابية على هذا من الناشرين .

التداخل الضوئي والألياف

تأليف

الدكتور / أحمد أمين حمزة .

الدكتور / نايل بركات



شكرو عرفان

يتوجه المؤلفان بخالص شكرهما للمؤسسات النشر والجهات العلمية الآتية لتفضلهم
بالموافقة على السماح باستخدام بعض الجداول والاشكال وصور التداخل الضوئي ومنح
الموافقة على تضمينها بالكتاب ، وهم :

، ١٩-٦ ، ١١-٦ ، ١٠-٦ ، ٩-٦ ، ٨-٦ ، ٢-٢ ، ١-٣ (اشكال IOP Publishing Ltd
٢٠-٦ ، الجنول رقم ٢-٣)

(الشكل ٥-٣) McGraw-Hill publishing Company

(اشكال ١٤-٦ ، ٥-٦ ، ٣-٦ ، ٩-٤) Textile Research Institute

(اشكال ٧-٩ ، ٦-٩ ، ١٢-٥ ، ٤-٥) Journal of Microscopy

(اشكال ١-٨ ، ٨-٧ ، ٧-٧ ، ١٣-٦) Optical Society of America

(شكل ٢١-٦) Elsevier Applied Science Publishers Ltd

(شكل ٥-٧) The Textile Institute

(شكل ٢-٨) Taylor & Francis Ltd

(اشكال ٤-٨ ، ٢-٨) Pergamon Press PLC

(اشكال ٢-٩ ، ٢-٩) Longman

(شكل ٥-٩) Carl Zeiss Jena

تقديم

حرص الأستاذ الدكتور نايل بركات والأستاذ الدكتور أحمد أمين حمزه منذ بدء حياتهما العلمية على الاخلاص والالتزام بمجال بحثهما العلمية وهو مجال استخدام سبيل التداخل الضوئى ودراسة الالياف البصرية ، ولذلك فإننا نرى فى هذا الكتاب الخلفية العلمية التى يجب أن يتزود بها شباب الباحثين للمضى قدما فى هذا الموضوع العلمى الحافل بما يجمع بين دقة البحث العلمى والبحث والتطبيق . ورغم أن علم البصرييات كان من فروع الفيزياء الأولى التى أثارت اهتمام العلماء فقد اظهرت السنوات الأخيرة أن البصرييات الفيزيائية والتطبيقية مايزال لديها الكثير مما تقدمه فى سبيل التقدم الحضارى .

وتتكون الالياف البصرية من شعيرات تتكون كل منها من نوعين مختلفين من الزجاج . يوجد الأول فى وسط أو لب الشعيرة ويكون الثانى الغلاف الخارجى أو القشرة . فإذا كان معامل انكسار مادة « اللب » اكبر من قيمته للقشرة فإن الضوء عند مروره فى الشعيرة يعانى انكسارا كليا عند سقوطه على السطح الفاصل بين اللب والقشرة وبذلك يظل الضوء داخل وسط الشعيرة تماما كما يظل الماء ينساب داخل انبوبة أو كما تتحرك الامواج الميكرونية داخل مرشد الامواج . ولاتأثر هذه العملية بانحناء الشعيرة ويظل الضوء منحصر داخلها . ويجب أن يكون الزجاج المستخدم فى صناعة الالياف البصرية غاية فى النقاء وعند ذلك يمكن لشعاع الليزر أن يسير مسافة تزيد على مائة كيلو متر خلال شعيرة بصرية محتفظا بمعظم شدته .

ولقياس معاملات الانكسار فإننا نحتاج لدراسة انتقال الضوء خلال الشعيرة فى اتجاه عمودى على محورها ويستخدم تداخل الضوء لقياس معامل الانكسار . وقد قام المؤلفان بتقديم وصف شامل لتداخل الضوء واجهزته التى تستخدم فى مختلف ميادين التطبيق . وسيجد الباحثون فى هذا الكتاب جميع مايلزمهم من الاساس العلمى الذى يمكنهم من المضى حثيثا فى هذا المجال الذى تزداد تطبيقاته يوما بعد يوم .

وأننا نشكر المؤلفين على تقديم هذا الكتاب وترجمته مساعدة للباحثين الشباب المهتمين
بهذا المجال .

محمد عبد المقصود /النادى

١٩٩٢/٧/٣

الاستاذ الدكتور / محمد عبد المقصود /النادى

أستاذ الفيزياء وصاحب المدرسة العلمية فى الفيزياء النظرية

والحاصل على جائز النولة التقديرية وعلى درجة الدكتوراه فى العلوم D. Sc.

مقدمة الطبعة العربية

أسهم التداخل الضوئى فى العديد من مجالات الفيزياء ، والفيزياء التطبيقية والهندسة . واكتسبت أهمية اسهامه بادخال طرق دقيقة لقياس خصائص فيزيائية على مدى واسع شمل التحكم فى عمليات انتاج العدسات ، وتشطيب الأسطح ، وعلم القياس والمعايرة وصناعة الألياف بانواعها ، الطبيعية كالقطن والصوف ، والتركيبية كالنيلون والبولى استر والألياف البصرية المستخدمة فى التراسل الضوئى .

لذلك ظهرت الحاجة الى مرجع حديث يتناول موضوعات التداخل الضوئى وتطبيقاته على الألياف ومن ثم يجد طلاب الدراسات العليا بكليات العلوم والهندسة والتربية والمشتغلين فى صناعة الغزل والنسيج والألياف مرجعا عن التداخل الضوئى والألياف سوف يقلل الحاجة الى الرجوع الى البحوث الأصلية ولن يرغب فى الاستفادة والتعمق سوف يجد مراجع عديدة مذكورة فى نهاية كل باب .

هذه هى النسخة العربية من كتاب ظهر باللغة الانجليزية بعنوان Interferometry of Fibrous Materials ونشر عام ١٩٩٠ ضمن سلسلة البصريات ، والبصريات الالكترونية التى تصدرها دار Adam Hilger للنشر - بريستول - نيويورك واستشعر المؤلفان الحاجة الماسة الى اضافة فصلين فى مقدمة الكتاب عن

أ- انبعاث الضوء وانتشاره وبعض الظواهر الضوئية الاخرى كالحبيود والامتصاص والتشتت والتفرق الضوئى وكذلك المصادر الضوئية المستخدمة فى تجارب التداخل .

ب- اشعة الليزر - أهم خصائصها واساس نظرية الفعل الليزرى وخصائص هذه الاشعة .

ويقدم الكتاب وصفا لاستخدام طرق التداخل الضوئى الثنائى والمتعدد وتطبيقاته فى دراسة الألياف . شمل ذلك وصفا وتحليلا لطرق التداخل الضوئى المختلفة وتطبيقاتها فى فحص وتعيين خصائص الألياف . وتركز الاهتمام على النظريات الاساسية التى يقوم عليها

تكوين هذب التداخل الضوئى وتسجيلها واستخلاص المعلومات من خرائط هذب التداخل باستخدام طرق تحليل الصور وتخزينها ثم معالجتها بهدف تعيين بروفيل معامل انكسار مكونات الشعيرة .

كما يحتوى الكتاب على نتائج تطبيق طرق التداخل الضوئى على الالياف . كما تركز الاهتمام على تقديم وصف العديد من ميكروسكوبات التداخل الضوئى التى يتم انتاجها عالميا على المستوى التجارى

ونهدف من تجميع وتقديم محتويات الكتاب مايلى :

١- شرح ظاهرة التداخل الضوئى وعرض لمقاييس التداخل الضوئى وتطبيقاتها على الالياف .

ب- لقد حاول المؤلفان الحفاظ على منسوب المعالجة الرياضية لموضوعات الكتاب بالقدر الذى لايتطلب من القارئ مستوى متقدما من الرياضيات لتفادى وضع أعباء إضافية على العلميين والمهندسين المشتغلين بصناعة الالياف الذين عليهم استيعاب حصيلة كبيرة من المعلومات .

ج- كما نهدف الى تقديم العون الى العلميين والمهندسين مستخدمى تطبيقات التداخل الضوئى على الالياف سواء كان لطلاب الدراسات العليا أو للمشتغلين فى الصناعة لكى تتوفر لهم رؤية واسعة لهذا المجال .

وتتوجه بالشكر الى الاستاذ الدكتور W.T. Welford والاستاذ الدكتور E.R. Pike للعديد من الملاحظات المفيدة والاقتراحات البناءة ، ذلك من خلال الطبعة الانجليزية من هذا الكتاب .

نأمل أن يكون هذا الكتاب مرجعا مفيدا لطلاب السنوات النهائية وطلاب الدراسات العليا لكليات العلوم والهندسة والتربية وكذلك للمشتغلين فى الصناعة فى مجالات تنتج وتستخدم الالياف بانواعها المختلفة .

القاهرة فى يونيو ١٩٩٢

أ.د. نابل بركات أ.د. أحمد / أمين حمزه

محتويات الكتاب

صفحة	
٧	مقدمة
١٣	الفصل الأول : انبعاث الضوء وانتشاره
١٣	١-١ الطيف الضوئي
١٤	٢-١ طبيعة الضوء
١٨	٣-١ الانعكاس والانكسار والاستقطاب
٢٢	٤-١ حيود الأشعة الضوئية
٢٦	٥-١ الامتصاص والتشتت
٢٩	٦-١ التفرق الضوئي
٣١	٧-١ المصادر الضوئية
٣٤	المراجع
٣٥	الفصل الثاني : أشعة الليزر
٣٥	١-٢ مقدمة
٣٦	٢-٢ أهم خصائص شعاع الليزر
٣٩	٣-٢ أساس نظرية الفعل الليزري
٤١	٤-٢ علاقتا اينشتاين والتعاكس الإسكاني للذرات
٤٤	٥-٢ التعاكس الإسكاني للذرات
٥٦	٦-٢ الفعل الليزري في ليزر الهيليوم - نيتون
٥٩	٧-٢ الترابط
٦٧	٨-٢ الكثافة الضوئية لشعاع الليزر
٦٩	٩-٢ شدة شعاع الليزر
٧٢	١٠-٢ درجة تباین هذب التداخل الضوئي الثنائي
٧٦	المراجع

صفحة	
٧٧	الفصل الثالث : مقدمة عن تركيب الألياف
٧٧	١-٣ طرق فحص تركيب الألياف
٧٨	٢-٣ تباين الخواص الضوئية في الألياف
٨٦	٣-٣ تركيب الألياف البصرية
٩٨	المراجع
١٠٠	الفصل الرابع : أساسيات التداخل الضوئي
١٠٠	١-٤ مقدمة
١٠١	٢-٤ تقسيم جبهة الموجة
١٠٤	٣-٤ تقسيم السعة
١٠٧	٤-٤ تداخل الضوء المستقطب في مستوى
١١٣	٥-٤ الهولوجرافيا والتداخل الضوئي الهولوجرافي
١١٥	٦-٤ البقعيات الضوئية والتداخل الناتج عنها
١٢٠	المراجع
١٢١	الفصل الخامس : تطبيقات التداخل الضوئي الثنائي على الألياف
١٢١	١-٥ مقدمة
١٢٥	٢-٥ نظرية ميكروسكوب التداخل الضوئي لبولتا
١٣٥	٣-٥ الانكسار الجانبي المزوج للألياف
١٣٩	٤-٥ تطبيقات طرق التداخل الضوئي الثنائي على الألياف البصرية
١٤٧	المراجع
١٥٠	الفصل السادس : تطبيق طرق التداخل الضوئي المتعدد على الألياف
١٥٠	١-٦ تكوين هيب التداخل الضوئي المتعدد وتطبيقاته على الألياف

صفحة

١٦٧	٦-٢ تطبيق هذب التداخل الضوئى المتعدد لتعيين معاملات انكسار الألياف
١٨٥	٦-٢ الألياف البصرية بنوعها GRIN, STEP.
١٩٣	٦-٤ تطبيق نظرية هذب تساوى الرتبة اللونية FECO على الألياف
١٩٧	٦-٥ تطبيق طرق التداخل الضوئى المتعدد لتعيين بعض الخصائص الفيزيائية للألياف
٢١٠	المراجع
٢١٢	الفصل السابع : دراسة طبغرافية سطح الألياف بالتداخل الضوئى
٢١٢	٧-١ تطبيق طرق التداخل الضوئى المتعدد محددة الموقع النافذة لدراسة طبغرافية الأسطح
٢١٤	٧-٢ تطبيق هذب التداخل الضوئى محددة الموقع عند الانعكاس لدراسة طبغرافية الأسطح
٢١٨	٧-٣ استخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى لدراسة طبغرافية أسطح الألياف
٢٢٣	المراجع
٢٢٤	الفصل الثامن : تأثير التشعيع على الخواص الضوئية للألياف
٢٢٤	٨-١ تأثير التشعيع بأشعة جاما وبالنيترونات على امتصاص الألياف البصرية للضوء
٢٢٧	٨-٢ تأثير التشعيع بأشعة جاما على قيمة معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف البصرية والألياف النسيجية التركيبية
٢٣٤	المراجع

صفحة	
٢٣٥	الفصل التاسع : ميكروسكوبات التداخل الضوئي
٢٣٥	١-٩ أساسيات ميكروسكوب التداخل الضوئي
٢٤٠	٢-٩ بعض أنواع ميكروسكوبات التداخل الضوئي
٢٥٥	المراجع
٢٥٧	الفصل العاشر : التشتت الخلفي لموجات الضوء بواسطة الألياف
٢٥٧	١-١٠ حالة سقوط الضوء عمودياً على محور الشعيرة
٢٦٦	٢-١٠ التشتت الخلفي في اتجاه محور الشعيرة
٢٧١	المراجع
	الفصل الحادي عشر : التحليل الأوتوماتيكي لخريطة هيب التداخل
٢٧٢	الضوئي
٢٧٢	١-١١ خطوات تحليل خريطة هيب التداخل
٢٨١	٢-١١ حساب بروفيل معامل الانكسار
	٣-١١ التحليل الأوتوماتيكي لخريطة هيب التداخل واستخلاص بروفيل
٢٨٥	معامل انكسار الشعيرة باستخدام هيب التداخل المستعرضة
٢٩٠	المراجع
٢٩١	المصطلحات العلمية

بسم الله الرحمن الرحيم

الفصل الأول

انبعاث الضوء وانتشاره

Emission and Propagation of Light

١/١- الطيف الضوئي : The optical spectrum

يبين الشكل رقم ١/١ خريطة كاملة للموجات الكهرومغناطيسية ، وتوصف هذه الموجات حسب طول موجتها بوحدة الانجستروم \AA (١ انجستروم = 10^{-10} متر) أو النانومتر (١٠-٩ متر) أو الميكرون (10^{-6} متر) ، أى أن ١ ميكرون = 10^4 انجستروم .

وينقسم الطيف الضوئي إلى ثلاث مناطق :

أ- منطقة فوق البنفسجية (10^{-10} - 3.9×10^{-8} نانومتر) .

ب- منطقة الطيف المرئي (3.9×10^{-8} - 7.7×10^{-8} نانومتر) .

ج- منطقة الأشعة تحت الحمراء (7.7×10^{-8} نانومتر إلى 10^{-3} ميكرومتر) .

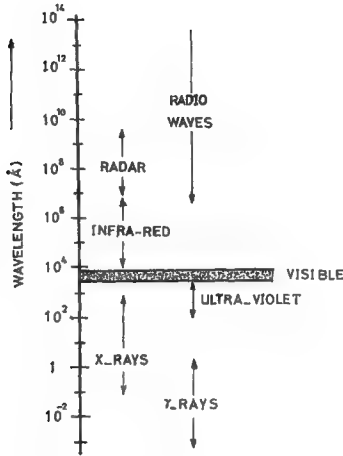
والأطوال الموجية المحددة لهذه المناطق ليست محددة بطريقة قطعية ، فمثلا : يمكن لأحد الأفراد رؤية الطيف المنبعث من ليزر الحقل (Al Ga As) ذات الطول الموجي ٨٠٠ نانومتر ، ويظهر على هيئة حزمة من أشعة الليزر ، لو أنها أحمر داكن ، إذ ترتبط الرؤية بعمر الرأى ، فكلما قرب من الشيخوخة قصر أطول طول موجى يمكنه رؤيته .

ويرتبط طول موجة الضوء λ بترددها ν بالمعادلة :

$$\nu = c/\lambda$$

ويكون طول موجة الضوء $\lambda = 9.4 \times 10^{-8}$ نانومتر المنبعث من ليزر اريزينا الجاليوم Ga As

ذات تردد $\nu = 3.2 \times 10^{14}$ هرتز .



شكل رقم (١/١) : الموجات الكهرومغناطيسية

٢/١- طبيعة الضوء : Nature of light

يرى العالم الألماني " ماكس بلانك Max Planck " عام (١٨٩٩) أن الضوء يتكون من عدد من الكم الضوئي quanta أو فوتونات Photons لها طول موجي وتردد معين ، وكذلك كمية محددة من الطاقة E تتناسب طرئاً مع تردد الفوتون ν . والعلاقة الآتية تعطي كمية الطاقة المصاحبة E بدلالة التردد ν :

$$E = h\nu$$

حيث h مقدار ثابت يساوي 6.63×10^{-34} إرج ثانية ، ويعرف بثابت بلانك . ويمثل الفوتون بحزمة موجية Wavepacket لها طاقة وكمية حركة momentum محددتان ، وهي خصائص جسيمية ، ولكن ليس للفوتون كتلة .

وتقترب هذه الحزم الضوئية في مواضعها من الصورة الحديثة لقطار الموجات. المترابطة الذي وصلت إلى توصيفه نظرية الترابط بين الموجات ، التي انبثقت بعد اكتشاف الانبعاث المستحث وأكتفتها خصائص حزم أشعة الليزر .

وفي عام (١٩١٣) قدم الفيزيائي الدنماركي « نيل بوهر Niels Bohr » نظرية تفسر طيف ذرة الأيدروجين وتعرف باسمه . ويفترض في نموذج بوهر للذرة أن الإلكترونات تدور في مدارات محددة حول النواة ، وهذه المدارات مناسبة محددة من الطاقة ، وينتقل إلكترون من مدار إلى مدار آخر مسموح به عن طريق انبعاث أو امتصاص فوتون ذي طاقة ΔE حيث :

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

حيث E_2, E_1 هما منسوبي الطاقة ، اللذان يتم بينهما الانتقال ، $E_2 > E_1$.

وتعتبر فكرة وجود مناسبة معينة من الطاقة في الطبيعة أحد الأفكار الأساسية التي أسهمت في تطوير ميكانيكا الكم .

ويطبق نظرية الكم على كمية التحرك الزاوي angular momentum – لا تأخذ قيم متصلة – نجح بوهر في اشتقاق المعادلة الآتية التي تربط العدد الموجي wavenumber – لأي خط طيفي منبعث من ذرة الأيدروجين المثارة – بالأعداد الكمية الأساسية principal quantum numbers والتي تعرف بالمدارات :

$$\bar{\nu} = \frac{2\pi^2 z^2 e^4 \mu}{h^3 c} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ where } \mu = \frac{mM}{m+M}$$

حيث $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$ سم^{-١} ، و n_1, n_2 عدنان صحيحان ، وهما العدنان الكميان الأساسيان للمنسويين اللذين يتم بينهما انتقال الإلكترون ، و m, e هما شحنة وكتلة الإلكترون ، و h ثابت بلانك ، و c سرعة الضوء ، و z العدد الذري ، وهو يساوي واحد في حالة ذرة الأيدروجين ، و M هي كتلة النواة .

$$\bar{\nu} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ where } R_H = \frac{2\pi^2 z^2 e^4 \mu}{h^3 c}$$

وتسمى R_H ثابت رايبرج Rydberg constant .

واقترح بعض الباحثين السابقين لبوهر معادلة وضعية تربط $\bar{\nu}$ بالعديدين الصحيحين ،
ووجدوا عمليا أن قيمة R تساوى $1.09678 \times 10^7 \text{ سم}^{-1}$. وعند التعويض بقيم M, c, h, m, e في
المعادلة التي اشتقها بوهر تلك تطابق قيمة R المحسوبة مع النتائج العملية . وكان ذلك
أحد المستندات التي تؤيد نظرية بوهر .

وعند تطبيق فرق جهد بين قطبي أنبوبة تفريغ تحتوى على أيديوجين تحت ضغط
منخفض ، فإن ذرات تثار . ويتم عمليات الإثارة بتصادم إلكترون مع ذرة ، أو بتصادم ذرة
مع ذرة ، وينبعث الضوء كنتيجة لانتقال الإلكترونات في ملايين الذرات المثارة ، حيث تتبعث
فوتونات ذات تردد ν :

$$\nu = (E_{n1} - E_{n2}) / h$$

E_{n2}, E_{n1} هما منسوبيا الطاقة اللذان يتم بينهما انتقال الإلكترون .

وتتشارك ملايين من هذه الفوتونات التي لها نفس التردد في تكوين خط الطيف ذي
التردد ν ، ويمكن تسجيل هذا الخط على لوح حساس وذلك باستخدام
مطياف spectrograph يحتوى على منشور أو على محزوز حيود ، وبذلك ينتج عن إثارة
ذرات العناصر وتحليل الأشعة المنبعثة منها خطوط طيف في المناطق الطيفية المختلفة ،
وتظهر خطوط الطيف عند تسجيلها كخطوط مضيئة ، تفصلها مسافات معتمة ، وتختلف
المسافات الفاصلة ، وكذلك الشدة الضوئية للخطوط من خط طيفي إلى آخر ، ولكل عنصر
خطوط طيف معينة تميزه عن العناصر الأخرى . ووجود خطوط الطيف ذات الأطوال الموجية
المميزة لعنصر ما في الأطياف المنبعثة من عينة مثارة ، دليل قاطع على وجود ذرات هذا
العنصر في العينة ، أي أن الأطياف المنبعثة من عنصر ما هي بصمته المميزة Finger
print ، والشدة الضوئية لخط الطيف هي مقياس لتركيز العنصر في العينة .

ويمكن أن ننظر إلى خطوط الطيف المنبعثة من الذرات المثارة على أنها لغة تعبر هذه
الذرات بها عن نفسها . أي أن الذرات تتكلم بلغة الأطياف ، ويعتبر مكان خط الطيف (طوله
الموجي) ، وشدة الضوئية ، ووجوده ضمن سلاسل أو مجموعات series ، ووجود تركيب

دقيق لخط الطيف ، وازواجية خطوط الطيف doublets أو ثلاثيتها triplets والتركيب الدقيق الأبق hyperfine structure هي المعلومات التي تعتمد عليها نظريات التركيب الذري وخصائص مكونات الذرات ، ومنها نستنتج وجود مناسيب للطاقة داخل الذرة وحساب طاقة المناسيب ، وديوران الإلكترونات في مدارات ، وبشكل وأنصاف أقطار هذه المدارات ، والدوران المغزلي للإلكترونات والنواة ، نستنتج ذلك من الأطياف التي يتم الحصول عليها عمليا من الذرات المثارة .

وتم الحصول على سلاسل طيف ذرة الأيدروجين وتسجيلها ، وهي : سلسلة ليمان Lyman والتي تظهر خطوطها الطيفية في منطقة الأشعة فوق البنفسجية ، وسلسلة بالمر Balmer والتي تظهر خطوطها الطيفية في منطقة الطيف المرئي ، وثلاث سلاسل تظهر في منطقة الأشعة تحت الحمراء وهي لياشون Paschen وبراكيت Bracket وفوندد Fund

$$\bar{v} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 2,3,4,5, \dots \text{ultra-violet}$$

$$\bar{v} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 3,4,5, \dots \text{visible}$$

$$\bar{v} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 4,5,6, \dots \text{near infra-red}$$

ولتسجيل سلسلة ليمان يستخدم مطياف مكوناته البصرية من الكوارتز ، حيث أن الزجاج يمتص الأطوال الموجية الأصغر من ٣٧٥٠ أنجستروم .

ونلاحظ أن بعض الانتقالات بين مناسيب طاقة مفضلة عن الانتقالات بين مناسيب أخرى ، وهذا هو السبب في اختلاف شدة الخطوط الطيفية الناتجة من إثارة ذرات عنصر معين . وبعض الانتقالات غير مسموح بها forbidden وبعض مناسيب الطاقة غير مستقرة metastable ، وبعضها لا يكون مفردا degenerate أي يحتوي على مدارات تحتية sub-levels .

ومن المعلوم أنه عندما تثار ذرة بامتصاص فوتون ذي طاقة $h\nu$ فإنها سرعان ما تعود إلى حالتها المستقرة بانبعاثها لفوتون له نفس الطاقة .

ويوجد ثلاث انتقالات أساسية بين مناسيب الطاقة والتي تحدث في الذرات والجزيئات :

١- الامتصاص Absorption .

٢- الانبعاث التلقائي Spontaneous emission .

٣- الانبعاث المستحث Stimulated emission .

وتتضمن الأمليات المنبعية من مصادر الطيف انبعاث تلقائيا وانبعاث مستحثا ولها نفس طول الموجة ، ولكن يختلفان في درجة الترابط بين الفوتونات المكونة لحزم الأشعة المنبعية Coherence ، ويكون الانبعاث التلقائي هو الغالب في المصادر الضوئية العادية - وسنتناول في الفصل الثاني النسبة بين شدة الانبعاث التلقائي وشدة الانبعاث المستحث في المصادر الضوئية .

ويسתרزم للحصول على أشعة ليزر أن يكون الانبعاث المستحث هو الغالب ، وتنتج في هذه الحالة أشعة ذات خصائص متميزة .

٣/٨- الانعكاس والانكسار والاستقطاب :

Reflection, refraction and polarization of light

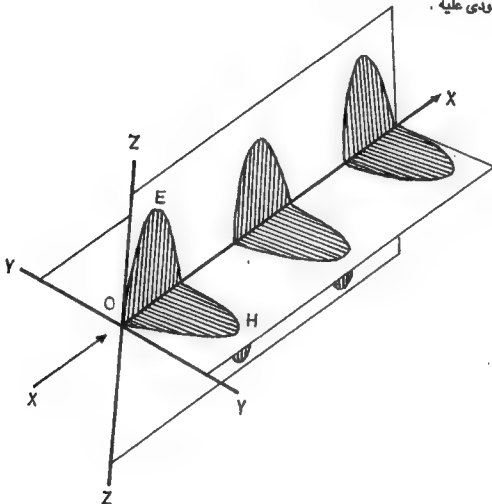
انعكاس وانكسار أشعة الضوء :

تحدد قوانين بسيطة اتجاه الأشعة الضوئية المنعكسة والمنكسرة ، والدراسة الكاملة لهاتين الظاهرتين تتطلب تناول سعة وطور هذه الأشعة ، وتحقيق هذا الهدف يلزم أن نبدأ بتمثيل الضوء المستقطب في المستوى الذي تتحدد فيه ذبذباته المتوازية ، والسبب في ذلك أن الشدة الضوئية المنعكسة والمنكسرة عند السطح الفاصل بين وسطين عازلين تتوقف على مستوى استقطاب ذبذبات قطار الموجات الساقطة . فلاتجاهين الأساسيين أو الرئيسيين لذبذبات الضوء وهما الذبذبات الموازية لمستوى السقوط والمتعامدة على هذا المستوى ، يوجد - لكل منهما - تعبير رياضي ، يربط بين الشدة الضوئية وزاويتي السقوط والانكسار ، وهو تعبير مغاير لاتجاه الذبذبات الآخر .

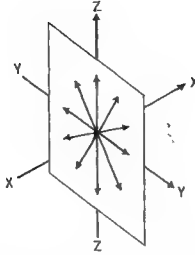
دعنا نتناول تمثيل أبسط أنواع الموجات الكهرومغناطيسية التي تكون فيها جبهة الموجة مستوية وعند أية نقطة يمر بها قطار الموجات تتذبذب السعة الكهربائية والسعة المغناطيسية

فى اتجاه خطوط مستقيمة متعامدة وعموديا على اتجاه مسار الضوء . يبين شكل (٢/١) قطار من الموجات يسير قدما فى اتجاه محور X ، وتوجد موجات تتبع المنحنى الجيبى فى المستويين (Y,X) ، (Z,X) ، وتسمى هذه الموجات بالموجات المستقطبة فى مستوى ، ويعنى هذا أن قمة المتجه E أو H تتذبذب فى الاتجاه الموضح فى الشكل .

والشكل رقم (٢/١) يمثل حزمة من الأشعة الضوئية العادية ، أى غير المستقطبة ، حيث يتذبذب المتجه الكهربى E فى جميع الاتجاهات بشكل متماثل حول اتجاه انتشار الضوء وعمودى عليه .



شكل رقم (٢/١) : قطار من الموجات الضوئية المستقطبة فى مستوى وتسير قدما فى اتجاه المحور



شكل رقم (٢/١) : حزمة من الأشعة الضوئية غير المستقطبة

دعنا نتناول ظاهرة انعكاس وانكسار قطار من الموجات الكهرومغناطيسية عند السطح الفاصل بين وسطين عازلين معامل انكسارهما n' ، n ، حيث $n' > n$ وكما هو موضح في الشكل رقم (٢/١) يمثل الموجة شعاع مفرد ، ويقع السطح الفاصل في المستوى $Y - Z$ ، ومركز الإحداثيات O هو نقطة السقوط ، والعمودى على هذا السطح عند نقطة السقوط هو محور X ، وتقع الأشعة الساقطة والمنعكسة والمنكسرة جميعها في مستوى واحد هو مستوى السقوط وهو المستوى $X - Y$.

ولكى نحصل على التعبير الرياضى الذى يعطى الشدة الضوئية المنعكسة والشدة الضوئية المنكسرة كنسبة من الشدة الضوئية الساقطة عند السطح الفاصل ، يكفى أن نتناول وتحلل حالتين فقط : الحالة الأولى : عندما يكون الشعاع الساقط مستقطباً في مستوى السقوط ، أى يكون متجهه الكهربى يتذبذب موازياً لهذا المستوى ، والحالة الثانية : عندما يكون مستوى الاستقطاب عمودياً على مستوى السقوط .

وقد تمكن العالم الفرنسى « فرنل Fresnel » من اشتقاق المعادلات التى تعطى نسبة سعة الموجة المنعكسة إلى سعة الموجة الساقطة للحالتين السابق ذكرهما أى عندما يكون الشعاع الساقط مستقطباً في مستوى السقوط وكذلك في المستوى العمودى عليه بدلالة زوايا السقوط والانكسار .

وكذلك النسبة بين سعة الموجة المنكسرة إلى سعة الموجة الساقطة في الحالتين .

ونظرا لأننا لم نتناول حالة سقوط الأشعة غير العمودية في أبواب هذا الكتاب ، فقد اكتفينا بتناول الانعكاسية عند السقوط العمودى فقط ، وفيه يكون التعبير الرياضى للشدة الضوئية المنعكسة هو نفسه في حالتى الأشعة المستقطبة في مستوى مواز لمستوى السقوط وعموديا عليه .

فالانعكاسية R عند السقوط العمودى تعطىها العلاقة الآتية بعد وضع $n = 1$ ، $n' = n$ ،

$$R = \frac{E_r^2}{E_i^2} = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

ذلك إذا كان الوسط المحيط بالسطح هو الهواء .

حيث E_r ، E_i تمثلتا سعة الموجة المنعكسة والساقطة على الترتيب .

هذه العلاقة الهامة أمكن اشتقاقها من معادلات فرنل التى تعبر عن الحالة العامة ، وهى السقوط المائل عندما تكون زاوية السقوط تساوى صفرا ، فانعكاسية سطح مفرد نظيف من عازل مثل الزجاج حيث $n = 1.50$ بالتعويض فى العلاقة السابقة تعطى $R = 4\%$.

الانعكاس عند سطح معدنى :

تظل معادلة Fresnel صحيحة فى حالة السقوط العمودى على سطح معدنى إذا ما أخذ معامل الانكسار المركب $\tilde{n} = n(1 - ik)$ مكان معامل انكسار العازل n فى المعادلة ، فالنسبة بين سعة الشعاع المنعكس إلى الشعاع الساقط تعطىها المعادلة :

$$\text{النسبة هي } \frac{n-1}{n+1}$$

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{E_i e^{i\theta}}{E_i} = \frac{n(1-ik) - 1}{n(1-ik) + 1} = \frac{n-1-ink}{n+1-ink}$$

حيث θ هى زاوية تغير الطور عند الانعكاس (هواء / سطح معدنى) .

ويضرب طرفى المعادلة بالمرافق نحصل على :

$$\begin{aligned}
\frac{E_T}{E_0} &= \frac{(n-1) - ink}{(n+1) - ink} \times \frac{(n+1) + ink}{(n+1) + ink} \\
&= \frac{(n^2-1) - ink(n+1) + ink(n-1) + n^2k^2}{(n+1)^2 + n^2k^2} \\
&= \frac{(n^2-1) + n^2k^2}{(n+1)^2 + n^2k^2} - \frac{2ink}{(n+1)^2 + n^2k^2} \\
&= \sqrt{A^2 + B^2} e^{i\theta} = \sqrt{A^2 + B^2} e^{i \tan^{-1} B/A}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R &= A^2 + B^2 \quad \text{وتكون الانعكاسية} \\
&= \frac{(n-1)^2 + n^2k^2}{(n+1)^2 + n^2k^2} \\
\tan \theta &= \frac{B}{A} = \frac{2nk}{1-n^2-n^2k^2}
\end{aligned}$$

هذه المعادلة تعطي تغير الطور عند الانعكاس (هواء / سطح معدني) عند السقوط العمودي ، فإذا أخذنا في الاعتبار طور الأشعة عند الانعكاس ، فإنه يتطلب تعديل شرط الحصول على هيب التداخل المضيئة عند النفاذ وهيب التداخل الممتدة عند الانعكاس .

٤/١- حيود الأشعة الضوئية : Diffraction of Light

عندما يمر شعاع ضوئي خلال فتحة ضيقة ، فإنه دائما ينتشر إلى حد ما خارج حدود المنطقة المعرضة للضوء ، وبعبارة أخرى نجد أن الضوء ينتشر في منطقة الظل الهندسي ، وتسمى ظاهرة انحناء الضوء عند الحواف الصادة وعدم التزامه بالانتشار في خطوط مستقيمة عند مروره بهذه الحواف بظاهرة حيود الأشعة الضوئية .

وينقسم حيود الأشعة الضوئية إلى نوعين :

١- حيود فرائنهوفر : **Fraunhofer diffraction** وفيه يكون المصدر الضوئي والحائل الذي يتكون عليه نموذج الحيود على مسافات بعيدة من الفتحة المسببة

لهذا الحيود ، فتصل حزمة من الأشعة المتوازية منبعثة من المصدر لإضاءة الفتحة وتجمع الأشعة النافذة والحائدة في المستوى البؤري للعدسة .

ب- **حيود فرنل Fresnel diffraction** : وفيه يكون المصدر الضوئي أو الحائل أو كلاهما على مسافة محددة من الفتحة المسببة للحيود .

نموذج حيود فرائهوفر باستخدام فتحة مستطيلة :

Fraunhofer diffraction pattern using a rectangular slit :

يبين الشكل رقم (٤/١) النظام البصري المستخدم للحصول على حيود فرائهوفر باستخدام فتحة مستطيلة . دعنا نحصل على محصلة الموجات التي تمثلها المتجهات الآتية :

$$a_1 e^{i\phi_1}, a_2 e^{i\phi_2}, a_3 e^{i\phi_3}, a_4 e^{i\phi_4} \dots$$

للوصول الى هذا الهدف نرسم متجها طوله a_1 يصنع زاوية ϕ_1 مع ox كما في الشكل رقم (٥/١) ليمثل الموجة الأولى ، وتستمر في رسم متجهات تمثل بقية الموجات فيكون طول الخط الذي نستكمل له الشكل المضلع polygon الناتج ممثلا لقيمة سعة المحصلة ، وتمثل الزاوية ϕ المحصورة بين المحصلة واتجاه ox زاوية الطور .

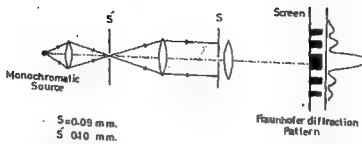
وفي حالة جمع مجموعة من الموجات على هيئة سلسلة فيها فرق الطور بين كل موجتين متتاليتين صغير جدا ولكنه يتغير باستمرار من موجة إلى أخرى ، فإنه ينتج منحنى بدلا من الشكل المضلع . ويمثل منحنى الطول عند أى نقطة على هذا المنحنى سعة الموجة المشاركة ، بينما تمثل الزاوية المحصورة بين المماس لهذا المنحنى عند هذه النقطة مع الخط ox طور هذه الموجة .

وعندما تكون مجموعة الموجات ذات سمات متساوية وعندها كبير جدا وفرق الطور بينها صغير جدا وثابت ، نصل إلى الحالة الخاصة الذي يتحول فيها الشكل المضلع إلى جزء من محيط دائرة (شكل رقم ٦/١) . وإذا كانت سعة الموجة هي a وعدد الموجات يساوى n فإن :

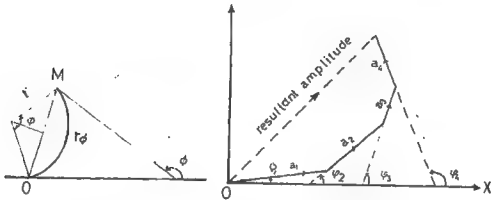
$$\text{Amplitude} = 2r \sin \frac{\phi}{2} = OM$$

$$\text{arc } OM = r\phi = na = A$$

$$r = na/\phi$$



شكل رقم (٤/١) النظام البصري المستخدم للحصول على حيود فرائنفور باستخدام فتحة مستطيلة



شكل رقم (٦/١) الحالة الخاصة عندما تكون مجموعة الموجات لها نفس السعة وعندها كبير جدا وارق الطور صغير جدا وثابت

شكل رقم (٥/١) تمثيل الموجات بالشكل المضلع .

وتعطي المعادلة الآتية محصلة السعة :

$$\text{The amplitude of resultant} = OM = 2r \sin \phi/2 = \frac{na \sin \frac{\phi}{2}}{\frac{\phi}{2}}$$

ويتضح من الشكل رقم (٧/١) أن فرق المسار يتغير باستمرار من صفر إلى $d \sin \theta$ ،

وبذلك يتغير فرق الطور من صفر إلى $\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$

$$\therefore \text{The amplitude of resultant} = \frac{A \sin \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta}{\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta}$$

$$\text{The intensity } I = A^2 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2}, \text{ where } \alpha = \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

1. When $\theta = 0 \therefore \alpha = 0$

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\sin \alpha}{\alpha} = 1$$

$$\therefore \alpha \rightarrow 0 \quad = A^2 = I_C$$

2. When $\alpha = m \pi$, where $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

$$\therefore I = \text{zero}$$

3. When $\alpha = \frac{3\pi}{2}$

$$I = A^2 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} = \frac{4}{9\pi^2} A^2$$

$$\therefore I = \frac{1}{22.2} A^2$$

4. When $\alpha = 5\pi/2$

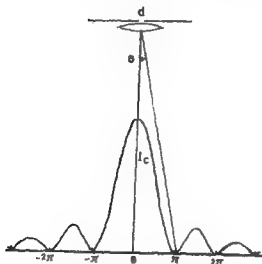
$$I = (4/25\pi^2) A^2 = \frac{1}{61} A^2$$

5. When $\alpha = \pi/2$, the intensity $I = I_D$

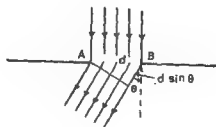
$$I_D = \frac{4}{\pi^2} A^2 = 0.405 A^2$$

$$I_D = 0.405 I_C$$

وبين الشكل رقم (٨/١) نموذج حيود فرانوفر الناتج من فتحة مستطيلة .

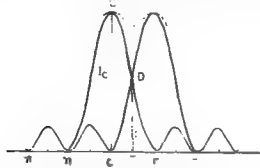


شكل رقم (٨/١) نموذج حيود فرانوفر الناتج من فتحة مستطيلة



شكل رقم (٧/١) تمثيل فرق المسار في حالة فتحة مستطيلة مفرقة .

وعندما تقع النهاية العظمى لنموذج حيود جسم ما على أول نهاية صغرى لنموذج حيود جسم آخر كما فى الشكل رقم (٩/١) ، تكون هذه هى الحالة التى تحدد أقل مسافة بين جسمين متجاورين يمكن الحصول على صورتين منفصلتين لهما . هذه هى حدود قدرة التحليل Just resolution وهى أسس معيار رالى للقدرة على التحليل والحصول على صور منفصلة Rayleigh's criterion for resolution



شكل رقم (٩/١) : حالة حدود قدرة التحليل (أسس معيار رالى للقدرة على التحليل والحصول على صور منفصلة) .

٥/٨- الامتصاص والتشتت : Absorption and Scattering

عندما تنتقل الموجات الكهرومغناطيسية خلال أى وسط مادي ، فإن شدتها تضمحل بالامتصاص والتشتت ، ويتغير شدة الموجات حسب المعادلة الآتية :

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

حيث I_0 هى شدة الموجات الابتدائية ، x هى المسافة التى قطعتها هذه الموجات خلال هذا الوسط ، μ هو معامل الاضمحلال attenuation coefficient بوحدة مقلوب المسافة .

وتوضح هذه المعادلة أن شدة الموجات تقل أسياً مع المسافة x التى قطعها الشعاع داخل الوسط . يتغير معامل الاضمحلال بتغير الطول الموجى λ ، ويمكن أن ينقسم إلى ثلاث مكونات أساسية :

$$\mu = \sigma_{\text{absorption}} + \sigma_{\text{Rayleigh scattering}} + \sigma_{\text{Mie scattering}}$$

ويتناسب تشتت رالى مع λ^{-4} ويحدث نتيجة وجود الجسيمات ذات الأبعاد التى تساوى الطول الموجي للضوء تقريباً . أما الجسيمات ذات الأبعاد الأكبر فإنها تسبب تشتتاً .

ماى Mie Scattering ، الذى يتغير بتغير حجم الجسيمات وشكلها ، ومعامل انكسار مادتها وزاوية التشتت ، وطول موجة الضوء .

تشتت الضوء Scattering of Light :

نوضح العالم « فرتل » أن غياب الأشعة العمودية على مسار حزمة أشعة الضوء التى تنتشر فى الفراغ يحدث نتيجة التداخل الضوئى الهدام للموجات ، التى يمكن اعتبار أنها تنبعث من جميع النقاط فى الحيز الذى تنتشر فيه أو يقطعه شعاع الضوء . تتحقق نفس الظروف فى وسط تام الشفافية وتام التجانس ، لكن وجود مناطق غير متصلة فى وسط لايتفق مع تلك الظروف المطلوبة لحدوث التداخل الضوئى الهدام ، يحدث تشتت عرضى للضوء وتنبعث أشعة عرضية نتيجته .

وفى سنة (١٩٦٦) وجد " Kao & Hockman " أن إضمحلال الضوء بواسطة الزجاج المستخدم فى تصنيع الألياف البصرية ليس خاصية أساسية للمادة ، ولكنه يحدث من الشوائب الموجودة فى هذه المادة وخصوصا أيونات المعادن . ويتحدد الفقد الذاتى أساسا من تشتت رالى ومقداره صغير جدا ، ويؤدى نقص محتوى الشوائب إلى معدل فقد أقل ، وقد لوحظ أيضا أن إضمحلال قدرة ٢٠ ديسبل / كم dB/Km (decibel per kilometer) للألياف البصرية الزجاجية المستخدمة فى التراسل الضوئى يعتبر الحد المقبول عمليا لاستخدامها فى التراسل لمسافات طويلة .

وفى عام (١٩٧٠) نجحت شركة Corning Glass الأمريكية فى تصنيع ألياف بصرية أحادية المنوال Single mode ذات فقد مقداره أقل من ٢٠ ديسبل / كم.

وفى سنة (١٩٧٢) أعلن عن الوصول إلى فقد أقل ومقداره ٤ ديسبل / كم ، وذلك لألياف بصرية عديدة المنوال ذات لب مصنوع من السيليكون .

وفى عام (١٩٧٦) نجح باحثون يابانيون فى تصنيع ألياف بصرية ذات محتوى هيدروكسيل (OH) قليل للغاية وتوصلوا إلى أقل فقد ممكن ومقداره ٠,٤٧ ± ٠,١ ديسبل / كم ، وهى قيمة قريبة جدا من قيمة الفقد الذاتى للمادة (تشتت رالى) . وباستخدام أطوال موجية أطول أمكن خفض مقدار الفقد إلى ٢,٠ ديسبل / كم سجل لألياف أحادية المنوال عند $\lambda = ١,٥٥$ ميكرون .

تشتت الضوء بالجسيمات الصغيرة : Scattering of light by small particles

يتشتت الضوء كنتيجة لوجود جسيمات صغيرة عالقة في وسط شفاف أو جزيئات المادة ، وقد بحثت هذه الظاهرة قبل اكتشاف التشتت (بالمواد الصلبة النقية الشفافة وكذلك السوائل والغازات) بوقت طويل .

فإذا سمع الشعاع من الضوء يمر خلال وسط شفاف يحتوى على جسيمات صغيرة عالقة ، معامل انكسار مادتها يختلف عن معامل انكسار الوسط المحيط بها ، فإن الضوء يتشتت في جميع الاتجاهات ، وإذا كانت هذه الجسيمات صغيرة جدا ، فإن الضوء المتشتت يكون جميعه مستقطبا استوائيا ، بحيث يكون المتجه الكهربى عموديا على اتجاه الضوء الساقط واتجاه الملاحظة ، وإذا كان الشعاع الساقط مستقطبا استوائيا ، فإن الضوء لايتشتت في الاتجاه الموازى لهذا المتجه الكهربى ، وتزيد شدة الضوء المشتت بسرعة بزيادة قطر الجسيمات ، وتتناسب طرديا مع مربع حجمها .

والمعادلة الآتية تعطى صيغة رالى لشدة الضوء I المشتت في الاتجاه الذى يصنع زاوية β مع الشعاع الساقط غير المستقطب .

$$I = I_0 \frac{(D^2 - D')^2}{D^2} (1 + \cos^2 \beta) \frac{\pi \pi v^2}{\lambda^4 r^2}$$

حيث I_0 هى شدة الضوء الساقط ، D, D' هما الكثافة الضوئية Optical densities للجسيمات والوسط المغمور فيه ، m هى عدد الجسيمات ، λ هى طول موجة الضوء ، v هى حجم الجسيم المشتت للأشعة الضوئية ، r هى المسافة من هذا الجسيم الى نقطة القياس .
وتوضح هذه المعادلة أن شدة الضوء في اتجاه السقوط هى ضعف الشدة في الاتجاه العمودى عليه .

تقلبات أو تغيرات الكثافة وتشتت اشعة الضوء :

يقال التداخل الهدام للأشعة المترابطة المشتتة في الاتجاهات العرضية بواسطة جزيئات سائل بقدر ملحوظ في وجود تقلبات في الكثافة ، وأثبتت الحركة البراونية Brownian للجسيمات الصغيرة في السائل أن هذه التغيرات في الضغط موجودة ، كنتيجة لها توجد تغيرات الكثافة التى تتناسب طرديا مع انضغاطية السائل Compressibility .

Depolarization of scattered light : المتشتت الضوء المستقطب

في حالة إضاءة الغازات والسوائل بضوء مستقطب ، فإنه عادة مايلاحظ أن الضوء أصبح مستقطبا جزئيا ، أي أنه حدث منع جزئي للاستقطاب depolarization ، يحدث ذلك عندما يكون الجزئ غير متجانس بالنسبة للاتجاهات الكارتيزية anisotropic ويكون ترتيب الجزيئات في اتجاهات مختلفة ولا تكون العناصر المسببة للتشتت موازية لذنبات الضوء .

ويحدث تشتت « مائي » عندما تكون الأطوال الموجية للضوء المستخدم أقل من أقطار الجسيمات العالقة والمسببة للتشتت ، فالسخان والغبار وقطيرات الماء هي المسببات الرئيسية لتشتت « مائي » في الجو . ويمكن التعبير عن تشتت « مائي » كميا بالمعادلة الوضعية الآتية (Pratt, 1969) التي تعطي معامل التشتت :

$$\sigma_{\text{Mie scattering}} = (3.91/v) (\lambda_c/0.55)^{-0.585} v^{1/3}$$

where σ_{MS} is per kilometer

v is the visual range in kilometers

λ_c is the wavelength in microns.

٦/١- التفرق الضوئي : Dispersion

كان « كوشي Cauchy » أول من حاول وضع نظرية لتفسير زيادة انكسار شعاع ضوئي عندما يقل طول موجة الضوء المستخدم وذلك عام (١٨٣٦) . فقد استنتج صيغة للتفرق الضوئي والتي تعرف باسمه وفيها يتغير معامل انكسار المادة n_λ مع الطول الموجي للضوء تبعا للعلاقة الآتية :

$$n_\lambda = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$$

ويتم حساب ثوابت هذه المعادلة A, B, C بتعيين قيم n_λ باستخدام ثلاثة أطوال موجية معروفة وبعبارة عن بعضها ، وقد وجد أن هذه المعادلة تمثل تفرق الضوء في معظم المواد الشفافة .

وقد قدم اكتشاف التفرق الشاذ أو غير المألوف anomalous dispersion والعلاقة بين الإمتصاص والتفرق معلومات مفيدة ، فقد وجد أن معامل انكسار مادة تعاني امتصاص انتقائيا selective absorption يزيد بسرعة عندما تقترب شوائب الامتصاص absorption bands من منطقة الأشعة فوق البنفسجية . وذلك لايوجد اختلاف أساسي بين التفرق المألوف والتفرق غير المألوف ، حيث يعتبر الأول حالة خاصة من الثاني ، وفي حالة التفرق المألوف فإن الدراسة والملاحظة تتم في مدى ضيق من الأطوال الموجية لايسمح بظهور هذا الشذوذ .

وقد استنتج "Sellmeier" معادلة تمثل التفرق الضوئي ، وذلك في حالة الأطوال الموجية التي تعتبر المادة بالنسبة لها شفافة تماما أى على جانبي شريط الامتصاص .

$$n_{\lambda}^2 = 1 + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_m^2}$$

حيث n_{λ} هي معامل انكسار المادة الطول الموجي λ ، λ_m هي الطول الموجي الذي يحده طيف امتصاص ذرة العنصر ، D هي مقدار ثابت يتغير مع نوعية بخار المادة .

التفرق الضوئي للمادة : Material dispersion

إن معامل انكسار مادة - كما سبق أن ذكرنا - هو دالة في الطول الموجي ، وتزيد سرعة الضوء في الوسط كلما نقص معامل انكسار مادة الوسط ، وتكون النتيجة أن الضوء المتكون من عدة أطوال موجية مختلفة ينتقل بسرعات مختلفة خلال نفس الشعيرة البصرية المستخدمة في التراسل الضوئي . والأطوال الموجية الأطول لها معامل انكسار أقل وسرعة انتقال أعلى ، ويسمى هذا التأثير بالتفرق الضوئي الذي تسببه المواد المستخدمة في تصنيع الألياف البصرية للضوء ويظهر كتفرق للأطوال الموجية Material or wavelength dispersion.

ويجب أن نفرق بينه وبين التفرق الموالي model dispersion والذي ينتج من وجود مناوئيل أى مسارات مختلفة للأشعة داخل الشعيرة .

ويقل التفرق الضوئي الذي تسببه المواد إذا ما استخدمت مصادر ضوئية ينبعث منها شرائط ضيقة من الأطوال الموجية أو خطوط طيفية حادة ضئيلة العرض ، وهذه هي حالة

ليزر الحقن injection laser والتي تصدر شرائط ضيقة جدا ذات عرض حوالى نانومتر واحد عندما تقارن مع الضوء الصادر من ثنائى باعث الضوء light emitting diodes والتي تصدر شرائط عرضها ٢٠-٤٠ نانومتر .

ويكون التفرق الضوئى للمواد ملحوظا جدا عمليا فى حالة الألياف البصرية وحيدة المنوال ، والتي يختفى فيها التفرق المنوالى أى الناتج من وجود أكثر من منوال . هذا ولقد وجد أن التفرق الضوئى الذى تسببه المواد يختفى عند طول موجى محدد ، فمثلا فى حالة الألياف البصرية المصنعة من السيليكا المنصهرة Fused silica يختفى التفرق الضوئى عند $\lambda = 1,27$ ميكرون ، ويزيادة الطول الموجى عن هذه القيمة يظهر التفرق الضوئى مرة أخرى ولكن بإشارة مختلفة .

ويمكن أن تصنع ألياف من السيليكا المنصهرة ذات تفرق ضوئى يساوى صفرا عند $\lambda = 1,32$ ، $\lambda = 1,55$ ميكرون ، وذلك يسمح باستخدام مصادر ضوئية ذات شرائط عرضية high band width وتعنى قيمة «التفرق الضوئى = الصفر» أنه يمكن استخدام الضوء غير المترابط الناتج من ثنائى باعث للضوء الذى يصدر عنه ضوء غير مترابط عند استخدام وصلات من الألياف .

٧/٨- المصادر الضوئية : Light sources

مصادر الضوء هى أجهزة ينبعث منها خطوط طيفية ، وتستخدم لإضاءة مقاييس التداخل الضوئى بأشعة أحادية الطول الموجى . وينبغى أن تكون هذه الخطوط الطيفية حادة ضئيلة العرض ، ولها شدة مناسبة وخالية من التركيب الطيفى الثقيل ، أى لا توجد فى مناطق مزدهمة بخطوط الطيف الدقيقة التى تحيط بخط الطيف ، وأن يقع طولها الموجى فى المنطقة الطيفية المرئية أو فى منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة أو فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية .

والمصادر الضوئية المستخدمة بكثرة فى القداخل الضوئى هى :

مصابيح الزئبق ذات الضغط العالى وذات الضغط المنخفض عند الطول الموجى ٤٦٠,٧٥ أنجستروم ، مصباح التالىوم عند ٥٢٥٠ أنجستروم ، مصباح الزئبق - كاديوم

، ونظير الزئبق ^{114}Cd ، ^{86}Kr ، ^{198}Hg ، وليزر الهيليوم نيون عند ٦٣٢٨ أنجستروم ،
وليزر الياقوت عند ٦٩٣٤ أنجستروم .

وتصدر مصابيح الزئبق - سواء عند الضغط العالي أو المنخفض - الخطوط الطيفية
الآتية في المنطقة المرئية ٥٧٩٠ ، ٥٧٧٠ أنجستروم (أصفر) ، ٥٦٠ ، ٧٥٠ أنجستروم
(أخضر) ، ٤٢٥٨ ، ٥ (أزرق) ، ٤٠٧٨ ، ٤٠٤٧ أنجستروم (بنفسجي) ، والحصول على ضوء
أحادى طول الموجة يمكن أستخدام مرشح ضوئى يقوم على التداخل
الضوئى interference filter مع مصباح الزئبق ، وتتميز هذه المرشحات بعرضها النصفى
الضيق ، وهو عرض النافذة الطيفية عند منتصف شدتها العظمى عند المركز λ ، ويكون
عرض هذه النافذة فى حدود ١٠ نانومتر ، وبالتالي فإن هذا المرشح يسمح بمرور الأطوال
الموجية $\lambda \pm ٥$ أنجستروم . وكلما قل العرض النصفى للخط الطيفى كلما قرب الشعاع
النافذ من أن يكون أحادى طول الموجة ولكن يحدث ذلك على حساب شدة الضوء النافذ .

ومرشح التداخل الضوئى الأخضر الذى تتركز نافذته عند $\lambda = ٥٦٠ ، ٧٥٠$ أنجستروم
وعرضه النصفى ١٠٠ أنجستروم ، يسمح فقط بمرور ضوء الزئبق الأخضر أحادى طول
الموجة ، ويحجب بقية الخطوط الطيفية لمصباح الزئبق ، حيث إن الطول الموجى عند ٥٧٧٠
أنجستروم يبعد عن الخط الأخضر بمقدار ٣١٠ أنجستروم .

ولكل مصدر طيفى مرشحه الخاص الذى يسمح بمرور الطول الموجى المناسب ،
ولا يحتاج مصباح الثاليوم إلى مرشح فى المنطقة الطيفية المرئية ، حيث إنه لا توجد أية
خطوط طيفية ذات شدة كافية فى هذه المنطقة غير خط الطيف عند ٥٣٥٠ أنجستروم ،
ويصدر مصباح الزئبق خطين طيفيين فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية عند الطول الموجى
٣٦٥٠ ، ٣٦٥٠ أنجستروم ، وهما خطان مناسبان لدراسات التداخل الضوئى فى هذه
المنطقة الطيفية . وفى هذه الحالة يستخدم مصباح زئبق لونا نافذة من الكوارتز ، حيث إن
الزجاج يمتص الأشعة فوق البنفسجية ، ويمرر فقط الأطوال الموجية فى منطقة الطيف
المرئى .

وفى أنظمة التداخل الضوئى التى تستخدم الضوء الأبيض - كما فى حالة هيب
التداخل الضوئى ، متساوية الرتبة اللونية - فإنه يستخدم مصدرا ضوئيا تكون فتيلته على

شكل كرة صغيرة متركزة في مركزه pointolite source ، وكثيرا ما تستخدم فتائل على هيئة خطوط مستقيمة في التجارب التي تحتوى على فتحات طولية ذات شق مستطيل . وتستخدم مصابيح الأيدروجين ذات نوافذ من الكوارتز كمصادر طيفية في منطقة الأشعة فوق البنفسجية .

وينبعث من المصادر العادية ضوء مترابط فوتواته جزئيا ، والفرق بينهما هو في كمية هذا الترابط ، وتظهر موجات الضوء كمنحنى جيبي تقى فقط في منطقة محدودة من الفراغ أو في زمن محدود أيضا .

وتحتوى المصادر الضوئية الليزرية على مميزات غير موجودة في المصادر العادية ، نمثلا في حالة أشعة الليزر تصدر كل الذرات أشعة طولها ثابت لمدة $\frac{1}{100}$ أو $\frac{1}{10}$ ثانية ، وفي بعض الحالات لفترات أطول .

وتنقسم المصادر الضوئية التي ينبعث منها ضوء في مناطق الطيف المنظور والأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية إلى ثلاث مجموعات :

أ- القوس الكهربى ، الشرارة ، أنابيب التفريغ الكهربى الضالية من الأقطاب electrodeless .

ب- المصادر الطيفية التي تستخدم لدراسة التركيب النقي ، وهى مصباح الكاثود الأجوف hollow cathode lamps ، ومصباح حزم الأشعة الذرية atomic beam ، ومصابيح النظائر isotope lamps .

ج- الليزر المستمر والنقي .

وأحد الفروق الرئيسية بين الأشعة المنبعثة من المجموعات الثلاث هو درجة نقائها الطيفى degree of monochromaticity ، وتقاس هذه الخاصية بالعرض النصفى لغلاف الأشعة المنبعثة ، وتتكون كل الخطوط الطيفية من أغلفة لمدى الترددات التي تتمركز حول منتصف الخط الطيفى ذى طول الموجة الذى يصف هذا الخط . وكما قل عرض الخط الطيفى كلما قرب من خط طيفى أحادى طول الموجة monochromatic . وسنشرح هذه الخاصية بالتفصيل فى الفصل الثانى ، ولكن من المفيد أن نذكر هنا أن العرض النصفى للخطوط الطيفية الصادرة من الثلاث مجموعات السابق ذكرها مرتبة ترتيبا تنازليا .

والعرض النصفى لخط الطيف هو محصلة مجموعة من العوامل وهي :

- | | |
|----------------------|----------------------------------|
| Natural broadening | ١- الاتساع الطبيعي |
| Collision broadening | ٢- الاتساع الناتج من التصادم |
| Doppler broadening | ٣- الاتساع الناتج من ظاهرة دوبلر |
| Stark broadening | ٤- اتساع شتارك |
| Self broadening | ٥- الاتساع الذاتى |

References

- Hecht E and Zajac A 1976, Optics (Reading : Addison - Wesley Publishing Company.
- Meyer - Arendt J R 1972, Introduction to Classical and Modern Optics (New Jersey : Prentice - Hall)
- Pratt W K 1969, Laser Communication Systems (New York : John Wiley & Sons) P. 131.
- Smith F G and Thomson J H 1988, Optics (Chichester : John Wiley & Sons).

الفصل الثانى

أشعة الليزر Lasers

١/٢- مقدمة :

كلمة ليزر جديدة على اللغة العربية ، وهى الحروف الأولى من جملة باللغة الإنجليزية تعنى تضخيم أو تكبير شدة الضوء بواسطة الانبعاث المستحث ، والجملة هى :

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

فى عام (١٩٦٠) تمكن العالم الأمريكى « ميمان Maiman » من صناعة أول ليزر على الإطلاق بواسطة بللورة من الياقوت المطعم بالكروميوم ، حيث انبعثت ومضات من الأشعة الحمراء طولها الموجى ٦٩٤٣ أنجستروم تتميز ببريق شديد فى اتجاه الأشعة ولا تفقد شدتها مع زيادة بعدها عن المصدر إلا ببطء ، شديد .

وهاليا أنواع الليزر من ناحية التكوين هى :

١- الليزر الغازى .

٢- الليزر البللورى .

٣- ليزر أشباه الموصلات .

٤- ليزر السوائل .

كما استحدثت أنواع أخرى .

ومن ناحية طبيعة الانبعاث تنقسم أشعة الليزر إلى نوعين :

١- شعاع مستمر (CW) Continuous waves .

٢- ومضات Pulsed lasers .

وأشعة الليزر قد تكون فى الطيف المنظور أو تحت الحمراء بمناطقتها الثلاث : القريبة والمتوسطة والبعيدة ، أو فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية . هذا وقد أمكن الحصول على

أشعة الليزر فى منطقة الموجات الميكرومترية ، ويسمى فى هذه الحالة ميزر MASER . وقد تم حديثا الحصول على أشعة ليزر تقع فى منطقة الأشعة السينية ذات أطوال موجية طولها ٢٠ , ٨ , ٢٠ نانومتر ، وذلك عند استخدام بلازما السيليونيوم كوسط ليزرى . وفيما يلى نورد أهم الخصائص المشتركة لجميع أنواع أشعة الليزر التى تميز هذه الأشعة عن تلك التى تنبعث من المصادر التقليدية :

٢/٢- أهم خصائص شعاع الليزر :

١- النقاء الطيفي :

فشعاع الليزر حزمة ضوئية غاية فى النقاء من ناحية الطول الموجي أو التردد ، فاشعة الضوء المنبعثة من المصادر الضوئية التقليدية - كمصباح الصوديوم أو الزئبق - نصفها بلتها وحيدة الطول الموجي إذا ما نفذت خلال مرشح ضوئى مناسب . كمصباح الصوديوم ينبعث منه طيف الصوديوم ، وهو طيف خطى لأنه طيف ذرى ويحتوى خطوط طيف ، أكثرها شدة ضوئية فى الطيف المنظور هما خطان فى الأصفر طولهما الموجي ٨٩٠ ، ٥٨٩٦ أنجستروم .

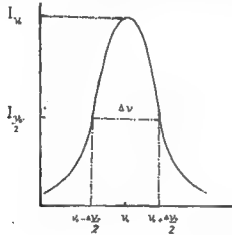
وفى حالة مصباح الزئبق ، يحتوى طيف نره الزئبق المنبعث من المصباح على خطين فى الأصفر أطولهما الموجية ٥٧٩٠ ، ٥٧٧٠ أنجستروم ، وخط فى الأخضر عند ٥٤٦١ أنجستروم وخط فى الأزرق عند ٤٣٥٨ ، ٥ أنجستروم ، وخطين فى البنفسجى عند ٤٠٧٨ ، ٤٠٤٧ أنجستروم . وباستخدام مرشح ضوئى تحصل على ضوء أحادى الطول الموجي عند ٥٤٦١ أنجستروم وإلونه أخضر . هذه الأشعة بالرغم من وصفها هنا بلتها وحيدة الطول الموجي ، إلا أنها فى الواقع تحتوى على أطوال موجية حول الطول الموجي الأساسى الذى يعطى أعلى شدة ضوئية .

ونقل الشدة الضوئية للأطوال الموجية الأخرى كلما ابتعدت عن الطول الموجي الأساسى لخط الطيف ، ومعنى هذا أن خط الطيف لى عنصر هو غلاف الشدة الضوئية لما يحتويه من أطوال موجية أو ترددات ، فنحن نعلم أن الطول الموجي \times التردد = سرعة الضوء $c = \lambda \nu$ والصيغة الرياضية لهذا الغلاف وهو ما نراه لخط طيف هى فى صورتها المبسطة ، بين الشدة الضوئية والتردد هى صيغة جاوس أو صيغة لورنتس ، وسنكتفى هنا بصيغة جاوس وهى $I_{\nu} = I_{\nu_0} e^{-\alpha(\nu - \nu_0)^2}$.

حيث ν هي التردد عند منتصف خط الطيف ، I_0 هي الشدة الضوئية عند تردد α ، ν بارامتر يميز بروفيل خط الطيف .

وعندما نمثل هذه المعادلة بيانياً نحصل على الشكل رقم (١/٢) ، وفيه يظهر بوضوح الاتساع الطيفي لخط الطيف ، ويسمى الاتساع الطيفي عند $I_0 = I_0 / 2$ بالاتساع الطيفي النصفى لخط الطيف ، وتتوقف قيمته على البارامتر α .

وواضح أنه كلما قل الاتساع الطيفي كلما زادت حدة خط الطيف ، قرب من خط الطيف المثالي الذي يحوى طولاً موجياً واحداً وهو بطبيعة الحال لا يوجد في الطبيعة إذ لابد لكي يرى أو يسجل أن يكون له اتساع طيفي ، وفي حالة أشعة الليزر يكون الاتساع الطيفي ضئيلاً جداً بمقارنته بالمصادر التقليدية ، ولهذا فإننا نصفه بأنه غاية في النقاء من ناحية الطول الموجي أو التردد .



شكل رقم (١/٢) : الاتساع الطيفي النصفى لخط الطيف

٢- تركيز الأشعة :

شعاع الليزر حزمة ضوئية مركزة تركيزاً شديداً ، أى زاوية انفرجها صغيرة للغاية ، وتسير الأشعة في خطوط مستقيمة أقرب ما تكون إلى التوازي ، وبهذا لاتخضع شدة استضاءة سطح يعترضها لقانون التربيع العكسي ، أى لاتقل شدة الاستضاءة عكسياً مع مربع المسافة عن مركز شعاع الليزر . ويعنى هذا أن حزمة أشعة الليزر لاتفقد شدتها إلا ببطء شديد ، فإذا ما أرسلت أشعة الليزر في اتجاه القمر على بعد ٤٠٠ ألف كيلومترا من سطح الأرض ، وكانت بالشدة الضوئية الكافية ، فإنها تفرش على سطح القمر بقعة مضاءة

لا يزيد قطرها عن كيلومتر واحد ، في حين أنه إذا أرسلنا الضوء العادى ووصل - فرضا - إلى سطح القمر ، فإن قطر البقعة المضاة تصل إلى ٢٤٧٦ كيلومترا .

ويصاحب عدم انقراج الأشعة بريقا شديدا في اتجاه الأشعة ، غسارا بالعين إذا ما استقبلته مباشرة وخاصة الأشعة تحت الحمراء ، إذ ينبعث عن الليزر أشعة لها طول موجى واحد - كما ذكرنا - تحدده مناسبة طاقة ذرات العنصر المضيء الذى يحتويه جهاز الليزر والذى تنبعث عنها أشعة الليزر عند إثارتها لتعطى الخصائص الجديدة ويمكن لذرات نفس العنصر أن ينبعث منها أشعة ليزر بطول موجى آخر بتعديلات داخلية فى جهاز الليزر ، فمثلا أحد أمثلة الليزر الغازى هو ليزر هيليوم - نئون ، إذ يحوى خليطا من غازى الهيليوم والنئون بنسبة ١ : ٧ تحت ضغط يتراوح بين ١ ، ٥ ، ١٠ ملليمتر زئبق ، وتسمى النيون بالضيء ، والهليوم بالضيء ، والذرة الفعالة هنا هى ذرة النيون ، وتصدر شعاعا مستمرا عند الأطوال الموجية الآتية : ٦٣٢٨ أنجستروم وهو فى المنطقة المرئية من الطيف ولونه أحمر ، ١ ، ١٥٠ ، ميكرون ، ٣ ، ٢٩ ميكرون وكلاهما فى منطقة الأشعة تحت الحمراء غير المرئية للعين . ولاتنتقل هذه الأطوال الموجية معا إنما كل على حدة ، وكل منهما متغيرات خاصة داخل الجهاز . وهذه الأطوال الموجية هى أطوال لبعض خطوط طيف النيون .

٣- تراكب وتماسك فوتونات الأشعة :

الخاصية الهامة الأخرى التى تميز أشعة الليزر هى خاصية التراكب أو التماسك بين الفوتونات المكونة للشعاع ، فنحن نعلم أن الأشعة المرئية وغير المرئية تصدر عن إثارة ذرات العناصر ، وتنبعث منها فى شكل كم ضوئى أو فوتون كمية من الطاقة لها طول موجى واحد يحدده منسوبها طاقة الذرة التى انتقلت بينهما ، وملايين هذه الانتقالات التى تحدث فى ملايين الذرات المثارة ينبعث عنها ملايين الفوتونات ، التى تظهر للعين المجردة كاشعة ضوئية متصلة وخطوط طيف . ويلاحظ هنا عدم وجود رابطة بين أى فوتونين من ناحية الفترة التى تتلخس بين بدء انبعاثها ، ولأصلة بين اتجاهيهما . فى حين أن أشعة الليزر فوتوناتها مترابطة وتماسكة ، فهناك فرق طور ثابت بين أى فوتونين فيها والجميع متحدة الاتجاه . هذا اختلاف أساسى بين أشعة الليزر المترابطة فوتوناتها وأشعة المصادر العادية . ويمكننا تشبيه الأشعة الضوئية العادية بلسوات منطلقة من ملايين المصادر المتماثلة ، لها نفس

التريد ، لكنها لا ترتبط بفارق زمني محدد بين أوقات انطلاقتها ، وبهذا تسمع عن بعد وكأنها ضجيج ، فى حين أنه إذا انطلقت هذه الأصوات فى نفس الوقت أو بفارق زمني ثابت فإنها تصبح حادة شديدة الأثر . هذه هى ظاهرة الترابط أو التماسك فى المصادر .

٣/٢- أساس نظرية الفعل الليزى :

الأصل فى الأساس النظرى لمواد الكم أو الليزر يرجع إلى العالم «أينشتين» عام (١٩١٧) الذى قام بدراسة نظرية لحالة وسلوك مجموعة من الذرات فى بناء ذرى تمت تأثير مصدر طاقة خارجى ، وحدد العناصر التى يقوم عليها الاتزان بين الأشعة المؤثرة والإشعاع المنبعث والممتص من الذرات ، وأوضح وجود نوع جديد من الإشعاع بجانب الإشعاع التلقائى الذى يصدر من جميع المصادر الضوئية العادية ، والإشعاع الجديد هو الانبعاث المستحث . وقد تمكن العالم «أينشتين» من اشتقاق القوانين التى تحكم العلاقات بين الانبعاث والإشعاع التلقائى والمستحث والامتصاص .

إن ذرات العناصر فى الطبيعة تكون فى حالة عدم إثارة نسبية أى ما يطلق عليها بالحالة الأرضية ، وتتوازن شحنة الإلكترونات النواة فى مدارات مع شحنة النواة ، وتشغل تلك الإلكترونات مدارات خاصة تصدها الطاقة الذاتية للذرة . وإذا ما أثيرت الذرة بمصدر خارجى ، غالباً ما تكون نتيجة تصادم بين هذه الذرة وذرة أخرى أو بينها وبين الكترون يسير بسرعة عالية ، فقد تقفز إلكترونات إلى مدارات أبعد من النواة ، وارتفاع الطاقة الكلية للذرة إلى منسوب أعلى . ولما كانت هذه الحالة عارضة فإن الذرة تميل إلى الرجوع إلى حالتها الأرضية بعد فترة زمنية قصيرة . يتم هذا بأن تفقد الذرة الطاقة المكتسبة بإشعاع فوتون أو كم ضوئى ، يحدد تردد الضوء المنبعث الفرق بين منسوبى طاقة الذرة طبقاً لعلاقة « بوهر » :

$$v = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

حيث E_1, E_2 طاقتى الذرة فى المستويين الأعلى والمنخفض h ، ثابت بلانك .

وتقاس الطاقة بوحدات الإلكترون فولت ، وهى وحدة ضئيلة القيمة بالمقارنة بوحدات الطاقة فالسعر هو الطاقة التى يكتسبها جرام واحد من الماء عند رفع درجة حرارته درجة

منوية واحدة ، يساوى ١٨١٠×٣٠ إلكترون فولت ، فى حين أن منسوب الطاقة الأرضى للهيدروجين هو ١٠ إلكترون فولت فقط ، وتحدث ملايين هذه الانتقالات للذرات وتظهر كضوء منبعث له تردد واحد كما يحدث هذا الضوء التلقائى للذرات بدون تحكم أى بطريقة عشوائية ، والنتيجة هى انبعاث الضوء العادى غير المترابط فوتونات من جميع مصادر الإضاءة التقليدية كمصباح الصوديوم أو الزئبق أو النيون . وفيما يلى قيم متوسط عمر بعض الذرات المثارة لمناسيب معينة من الطاقة .

الجدول رقم (١/٢)

الزمن بالثانية	العنصر
$٨-١٠ \times ٦,٥$	الليثيوم
$٨-١٠ \times ١,٥$	الصوديوم
$٥-١٠ \times ١$	الزنك
$٦-١٠ \times ٢$	الكالسيوم
$٧-١٠ \times ١,٥$	الزئبق

يتضح من الجدول السابق رقم (١/٢) أنه لكل ذرة عنصر مثارة منسوب طاقة معين هناك قيمة لمتوسط عمرها يحدث بعده الضوء التلقائى ، ولما كان من الممكن إثارة ذرات نفس العنصر لمناسيب محدده للطاقة ، فإنه لكل منسوب طاقة قيمة لعمر الذرة المثارة له . وإذا انتبهنا الفترة الزمنية التى تكون فيها الذرات مازالت مثارة فإنه يمكن تنشيط أو حث الهبوط إلى منسوب الطاقة الأقل وذلك بشحن الذرة بفوتونات منبعثة من مصدر خارجى يكون له نفس الطاقة التى تشعها الذرة تلقائيا ، وبهذا لا يكون الضوء عشوائيا ، إنما ضوء مستحث ، وتترك الفوتونات المنبعثة الجهاز كضوء مترابط الفوتونات أى متماسك الكم الضوئى . هذه هى أشعة الليزر .

وقبل البدء فى استنتاج علاقته « أينشتين » ينبغى الإشارة إلى توزيع ذرات الوسط بين مناسيب الطاقة .

ففى أية مجموعة من الذرات فى اتزان حرارى ، يكون عدد الذرات التى لها منسوب طاقة معين (E_2) أقل من عدد الذرات التى لها منسوب طاقة أقل (E_1) . فإذا رمزنا إلى عدد الذرات فى منسوبى الطاقة ١ ، ٢ بالعرفين (N_1) ، (N_2) فإن N_2 تكون أقل من N_1 إذا كانت E_2 أكبر من E_1 ، أى كلما زاد منسوب الطاقة قل عدد الذرات . يحدد هذه العلاقة قانون اكتشفه العالم الألمانى « بولتزمان » وهو

$$(N_2/N_1) = e^{-(E_2-E_1)/KT} \quad (2.1)$$

حيث K ثابت بولتزمان ، T درجة الحرارة المطلقة ، N_1 ، N_2 هما عدد الذرات فى وحدة الحجم عند المنسوبين E_1 ، E_2 .

٤/٢ علاقتا أينشتاين والتعاكس الإسكانى للذرات :

يتكون الشعاع المنبعث من مجموعة الذرات فى وجود مصدر خارجى للأشعة من جزئين :
الاول : هو الانبعاث التلقائى . وتتناسب شدته مع عدد الذرات التى تهبط من منسوب الطاقة E_2 الى E_1 ، ولا يرتبط بشدة المصدر الخارجى أو بطور أشعته .

والجزء الثانى : هو الانبعاث المستحث ، وتتناسب شدته مع شدة المصدر الخارجى الذى حثه على الانبعاث ويكون للإنبعاث المستحث نفس طور أشعة المصدر الخارجى .
والشكل رقم (٢/٢) يوضح عمليات الانبعاث التلقائى (أ) والانبعاث المستحث (ب) والامتصاص (ج) .

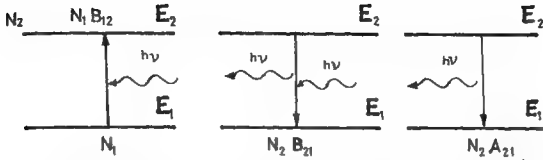
حيث : A_{21} يمثل احتمال الانتقال فى وحدة الزمن للانبعاث التلقائى من المنسوب رقم ٢ إلى المنسوب رقم ١ أى أن عدد انتقالات الخمود التلقائى فى الثانية =

$$N_2 A_{21}$$

وباعتبار أن B_{12} ، B_{21} ثابتا تتناسب مع احتمالية الانتقال للانبعاث المستحث والامتصاص على الترتيب . فإذا كانت كثافة الإشعاع عند تردد ν هى ν_0 فإن عدد الانتقالات إلى أسفل للانبعاث المستحث فى الثانية =

$$N_2 B_{21} \nu_0$$

$$N_1 B_{12} \nu_0 = \text{فى الثانية (الامتصاص) إلى أعلى}$$



شكل رقم (٧/٧) عمليات الانبعاث

تسمى المعاملات A_{21} , B_{21} , B_{12} بمعاملات أينشتاين . وفي حالة الاتزان يكون معدل انتقال الذرات من المنسوب الأقل إلى الأعلى مساويا لمعدلته من المنسوب الأعلى إلى الأقل :

$$N_2 A_{21} + N_2 B_{21} u_\nu = N_1 B_{12} u_\nu \quad (2.1)$$

$$u_\nu = N_2 A_{21} / (N_1 B_{12} - N_2 B_{21})$$

$$= \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{\left(\frac{N_1 B_{12}}{N_2 B_{21}} - 1 \right)}$$

ولكن من قانون بولتزمان $N_1 = N_2 e^{h\nu/KT}$ ، حيث $h\nu = E_2 - E_1$

$$u_\nu = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{\left(\frac{B_{12}}{B_{21}} e^{h\nu/KT} - 1 \right)} \quad (2.3)$$

وبالمقارنة مع صيغة قانون بلانك لكثافة الإشعاع ذي تردد ν

$$u_\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\left(e^{h\nu/KT} - 1 \right)} \quad (2.4)$$

نحصل على العلاقتين الآتيتين لمعاملات أينشتاين :

$$A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{21} \quad (2.5)$$

$$B_{21} = B_{12} \quad (2.6)$$

على ذلك ، ولجموعة ذرات في اتزان مع مصدر خارجي تكون النسبة بين معدل الانبعاث المستحث والانبعاث التلقائي هي :

$$(2.7) \quad \frac{1}{\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1\right)} = \frac{N_2 B_{21} u_\nu}{N_2 A_{21}}$$

وبالتعويض في هذه العلاقة بقيمة درجة الحرارة $T = 3000^\circ \text{K}$ كلّف نجد أن النسبة خفيفة للغاية . هذا هو الحال في مصادر الإضاءة العادية . ولما كان هذا الانبعاث الغالب يحدث كما ذكرنا نتيجة انتقالات عشوائية فإن الانبعاث التلقائي الصادر يكون غير مترابط ، لكنه في أجهزة الليزر أمكن تكبير الانبعاث المستحث حتى أصبح هو الإشعاع الغالب ، وما يصدر عن الليزر هو الفرق بين معدل الإشعاع المستحث ومعدل الامتصاص وهو ما يسمى بالكسب النهائي . ويمكن إثبات أن معدل الانبعاث المستحث يكون أكبر من معدل الامتصاص إذا ما كان عدد الذرات N_2 في منسوب الطاقة الأعلى E_2 أكبر من عدد الذرات N_1 في منسوب الطاقة الأدنى E_1 ، هذا هو الشرط اللازم للحصول على كسب نهائي أو الحصول على شعاع الليزر .

أي أن شرط حدوث الفعل الليزري هو

$$E_2 > E_1, N_2 > N_1$$

والسؤال هو : هل يتحقق هذا الشرط في مجموعات الذرات في اتزان حراري ؟ والإجابة بالنفي طبقا لقانون بولتزمان .

لذلك فشرط الحصول على شعاع الليزر هو عكس ما هو موجود في الطبيعة ، أي يتطلب حدوث تعاكس في توزيع عدد الذرات بين مناسيب الطاقة ، فيزيد عدد الذرات في مناسيب الطاقة العالية عن عدد الذرات في مناسيب الطاقة المنخفضة .

من العلاقة الرياضية لقانون بولتزمان يمكننا أن نصنف هذا الوسط الذي فيه $N_1 < N_2$ ، في حين أن $E_1 < E_2$ بأن درجة حرارته سالبة ، أي أن قيمة درجة الحرارة T في المعادلة تصبح نظريا سالبة .

وينمو الشعاع بإمراره في الوسط طبقا للعلاقة بين شدته I_ν وشدة الابتدائية $I_{0,\nu}$ وطول المسار x في الوسط ومعامل الكسب α وهي :

$$I_0 = I_{0,0} e^{\alpha x} \quad (2.8)$$

وعند مرور الشعاع فى وسط عادى فإن قيمة α تكون سالبة ، وتمثل هذه العلاقة اضمحلال شدة الشعاع بزيادة طول مساره نتيجة امتصاصه . أما فى حالة الوسط الذى يتمتع بتعكاس إسكانى للذرات فإن α تكون موجبة ، ولهذا فإن شدة الشعاع تنمو وتزيد كلما سار مسارا أطول فى الوسط . لهذا يوضع الوسط بين مرأتين عاكستين ليتضاعف المسار عشرات المرات وتحصل شدة الأشعة إلى قيمة ينطلق عندها شعاع الليزر ، قيمة يزداد فيها الكسب على الفاقد أثناء كل رحلة للشعاع بين المرأتين .

والحصول على وسط يتمتع بالتعكاس الإسكانى للذرات هناك طرق عدة ، منها :

١- الضخ الضوئى : وهو حادث فى ليزر الياقوت المطعم بالكروميوم .

٢- الإثارة بالالكترونات : وهو حادث فى ليزر الأرجون المتأين .

٣- تصادم الذرات : وهو حادث فى ليزر هيليوم - نيتون .

٤- تفاعلات كيميائية : وهو حادث فى ليزر فلوريد الأيدروجين الكيميائى .

إذا تكون نتيجة التفاعل فى النوع الرابع هى جزئ أو ذرة تركت فى حالة إثارة ، ففى الليزر الكيميائى لفلوريد الأيدروجين ينتج عن التفاعل جزيئات فلوريد الأيدروجين المثارة $H_2 + F_2 = 2 HF$ ، وعند توفر ظروف مواتية يحدث تعاكس إسكانى .

٥/٢- التعاكس الاسكانى للذرات : Population inversion

نتناول هنا الأساس النظرى وطرق الحصول على التعاكس فى إسكان الذرات فى مناسيب الطاقة . ولقد سبق أن ذكرنا عند تناول الأساس النظرى للفعل الليزرى قانون « بولتزمان » الذى يحدد توزيع الذرات فى مناسيب الطاقة لوسط فى اتزان حرارى ، وتبعاً له يكون عدد الذرات فى منسوب الطاقة الأدنى أكبر من عدد الذرات فى منسوب الطاقة الأعلى ، ويحدد القانون النسبة بين العددين . ولكى يحدث تعاكس فى إسكان الذرات فى مناسيب الطاقة فإن ذلك يتطلب إثارة الذرات عن طريق توفير طاقة تصب فى الوسط بهدف تقليل عدد الذرات فى المستوى الأدنى N_L وزيادة عدد الذرات فى المستوى الأعلى N_U ، وهذا هو مانعني بالتعكاس الاسكانى للذرات .

وتسمى هذه العملية بالضغط إذ يتم إعادة توزيع الذرات من مناسيب الطاقة وكأنه قد تم خسخها من المنسوب الأدنى إلى المنسوب الأعلى بالطرق التي سبق ذكرها .

وتاريخيا نجح العالم الأمريكي « تاونس Townes » عام (١٩٥٤) في الحصول على التعاكس الإسكاني بواسطة حزمة من جزيئات الأمونيا وصنع الميزر الذي ينبعث منه أشعة بطول موجي ١,٢٥ سم . ولما كانت جزيئات الأمونيا موزعة على مناسيب الطاقة في اتزان حراري ، فقد أمكن تجمع الجزيئات في المنسوب الأعلى وإخلاء المنسوب الأدنى منها بواسطة مجال كهربي غير متجانس ، وبذلك تم الحصول على التعاكس في إسكان الجزيئات بين مناسيب الطاقة ، لكن هذه الطريقة التي تم بها الحصول على التعاكس الإسكاني عن طريق خفض عدد الجزيئات في المنسوب الأدنى لايمكن تطبيقها بنجاح في الانتقالات الضوئية ، إذ أنه طبقا لقانون بولتزمان فإن عدد الذرات N_L , N_U ترتبط بالعلاقة :

$$N_U = N_L \exp (-h\nu / K_B T)$$

حيث K_B هو ثابت بولتزمان ، ولما كانت $h\nu \ll K_B T$ في مدى الموجات الميكرومترية فإن $N_U \approx N_L$ في حين أن عدد الذرات N_U التي تسكن المنسوب الأعلى في حالة الموجات الضوئية يكون صغيرا للغاية لأن $h\nu \gg K_B T$ عند تردد ν في مدى الموجات الضوئية . لهذا السبب ولكي نحصل على انبعاث مستحث في المدى الضوئي فإنه لا يكفي أن نزيل الذرات في المستوى الأدنى أي نغليها منها ، إنما يلزم زيادة عدد الذرات في المنسوب الأعلى بواسطة عملية الضغط .

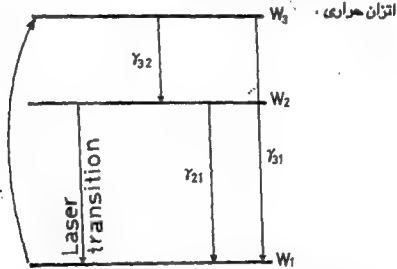
نأخذ حالة نظام مكون من منسويين . فنجد أن عند إثارة الذرات بالتشعيع أو بتصادمها مع الكثرونات ، يزداد عدد الذرات التي تسكن المنسوب الأعلى لكنه في نفس الوقت يزداد احتمال الضمود من المنسوب الأعلى الذي يرجع الذرات المثارة ثانية إلى المنسوب الأدنى بزيادة الضوء الساقط أو الإلكترونات التي تدخل في التصادم . والنتيجة هي أنه مهما كانت شدة إثارة الذرات ، فإنه لايمكن الحصول على التعاكس في إسكان الذرات ، لهذا يلزم استخدام نظم تقوم على ثلاثة أو أربعة مناسيب ذرية للحصول على التعاكس الإسكاني . ولايتطلب ذلك بالضرورة دائما أن تكون مناسيب الطاقة مفردة أو حادة إنما يمكن استخدام مناسيب شريطية ، ولهذا فإنه يمكن اعتبار ليزر الصبغة وليزر أشباه الموصلات أنها تقوم على نظام المناسيب الأربعة التي سوف نتناولها بعد ذلك .

التعكس الإسكاني للذرات في ليزر المناسيب الثلاثة

Population inversion in a three level laser :

يوجد عدد كبير من أنواع الليزر الذي يتم فيه الفعل الليزري على أساس المناسيب الثلاثة ، مثل ليزر الياقوت وأنواع ليزر الغازات . دعنا نرمز للطاقة وأعداد الذرات التي تسكن المناسيب الثلاثة التي تتخل في الفعل الليزري كما يلي :

W_1, W_2, W_3 و N_1, N_2, N_3 كما هو موضح في الشكل رقم (٣/٢)
فإن $W_1 < W_2 < W_3$ فإن $N_3 < N_2 < N_1$ في نظام المناسيب الثلاثة في حالة



شكل رقم (٣/٢) : رسم تخطيطي لمناسيب الطاقة في نظام المناسيب الثلاثة

ويجدر بالذكر أن المنسوب الأدنى الذي يرمز له بالرقم ١ هنا ليس هو بالضرورة المنسوب الأرضي للذرة . ويتم إثارة الذرات من المنسوب رقم ١ إلى المنسوب رقم ٢ بواسطة التصادم مع فوتونات ، الكترونيات أو ذرات مثارة لها طاقة مناسبة . دعنا نرمز إلى احتمال إثارة الذرة من المنسوب ١ إلى المنسوب ٢ بالرمز γ_{21} عن طريق أية طريقة للضخ . والشكل رقم (٣/٢) يقدم رسماً تخطيطياً لمناسيب الطاقة لنظام المناسيب الثلاثة .

وعند إيقاف الضخ تعود الذرات المثارة تدريجياً إلى حالة الاتزان الحرارى ، وتعرف هذه العملية بالاسترخاء relaxation ، وهي تحدث متزامنة مع إثارة الذرات الأخرى . وبالإضافة إلى وجود عملية مشعة أى ينبعث عنها اشعاع ، حيث تنتقل الذرات المثارة إلى الحالة الأدنى

بإنبعاث فوتون ، توجد عمليات غير مشعة كالتي تحدث نتيجة تصادم جزيئات الغازات أو تفاعل الذرة مع الشبكة في الجوامد ، حيث تنتقل الذرات المثارة إلى الحالة الأدنى عن طريق الإفراج عن طاقتها على هيئة طاقة حركة للجزيئات أو طاقة اهتزاز للشبكة . ولما كان الاسترخاء هو نتيجة هذه العمليات الاحصائية فإن معدل الاسترخاء أو ثابت الاسترخاء يعرف بأنه المتوسط الإحصائي لاحتمالات استرخاء الذرات المثارة في وحدة الزمن ، وأن مقلوب معدل الاسترخاء هو متوسط عمر الذرات المثارة .

ترتبط الاحتمالية γ_{Lu} لذرة أثيرت حراريا من الحالة الأدنى W_L إلى الحالة الأعلى W_u بالاحتمالية γ_{uL} للعملية العكسية من W_u إلى W_L بالاسترخاء الحرارى بالعلاقة الآتية في حالة الاتزان الحرارى :

$$N_u \gamma_{uL} = N_L \gamma_{Lu}$$

حيث :

$$N_u = N_L e^{-\left(\frac{W_u - W_L}{K_B T}\right)}$$

حيث T درجة حرارة الوسط .

وعلى ذلك فإن :

$$\frac{\gamma_{Lu}}{\gamma_{uL}} = e^{-\left(\frac{W_u - W_L}{K_B T}\right)} \quad (2.9)$$

والعلاقة السابقة صحيحة حتى لو لم تكون N_L ، N_u تمثلان عدد الذرات التى تشغل مناسيب الطاقة وهى فى حالة عدم اتزان حرارى .

وإذا كانت قيم هذه الاحتمالات ثابتة للحالات السابق ذكرها ، فإن المعادلات التى تعبر عن معدل تغير عدد الذرات فى كل مناسيب من الثلاثة للنظام تحت تأثير الضخ هى كما يلى :

$$\frac{dN_1}{dt} = -\left(\Gamma + \gamma_{12} + \gamma_{13}\right)N_1 + \gamma_{21}N_2 + \gamma_{31}N_3 \quad (2.10)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \gamma_{12}N_1 - \left(\gamma_{21} + \gamma_{23}\right)N_2 + \gamma_{32}N_3 \quad (2.11)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = (\Gamma + \gamma_{13})N_1 + \gamma_{23}N_2 - (\gamma_{31} + \gamma_{32})N_3 \quad (2.12)$$

حيث $N = N_1 + N_2 + N_3$ ثابت = العدد الكلى للذرات التى تسكن المناسيب الثلاثة فى النظام .

والحالة المستقرة ، يمكن الحصول على توزيع عدد الذرات تحت الفسخ المستمر عن طريق مساواة معدلات التغير بالصفر للمعادلات (١٠-٢ ، ١١-٢ ، ١٢-٢) ، وبالرغم من أنه يمكن حل المعادلات لنحصل على N_1, N_2, N_3 إلا أنه يمكن تبسيط الحسابات بافتراض أن التباعد - أى المسافات - بين المناسيب كبيرة بمقارنتها مع الطاقة الحرارية $K_B T$ ، وعند تطبيق المعادلة رقم (١-٢) نجد مايلى :

$$\gamma_{12} \ll \gamma_{21}$$

$$\gamma_{23} \ll \gamma_{32}$$

$$\gamma_{13} \ll \gamma_{31}$$

لهذا فإنه يمكن إهمال $\gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{23}$ ، وتأخذ المعادلات (١٠-٢ ، ١١-٢ ، ١٢-٢) الصور الآتية للحالة المستقرة :

$$-\Gamma N_1 + \gamma_{21}N_2 + \gamma_{31}N_3 = 0 \quad \Gamma N_1 = \gamma_{21}N_2 + \gamma_{31}N_3$$

$$-\gamma_{21}N_2 + \gamma_{32}N_3 = 0 \quad \gamma_{21}N_2 = \gamma_{32}N_3$$

$$\Gamma N_1 - (\gamma_{32} + \gamma_{31})N_3 = 0 \quad \Gamma N_1 = (\gamma_{32} + \gamma_{31})N_3$$

$$\text{Therefore } \gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})(N_1 + N_2 + N_3) =$$

$$\gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})N_1 + \gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})N_2 + \gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})N_3 =$$

$$\gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})N_1 + \gamma_{32}N_3(\gamma_{31} + \gamma_{32}) + \gamma_{21}\Gamma N_1$$

$$\begin{aligned}
&= \gamma_{21} (\gamma_{31} + \gamma_{32}) N_1 + \gamma_{32} \Gamma N_1 + \gamma_{21} \Gamma N_1 \\
&= N_1 \left\{ \gamma_{21} (\gamma_{31} + \gamma_{32}) + (\gamma_{21} + \gamma_{32}) \Gamma \right\}
\end{aligned}$$

ونحصل على المعادلات (١٣-٢) ، (١٤-٢) التي تعطى قيم N_2 , N_1 كنسبة من العدد الكلى N .

$$N_1 = \frac{\gamma_{21} (\gamma_{31} + \gamma_{32})}{\gamma_{21} (\gamma_{31} + \gamma_{32}) + (\gamma_{21} + \gamma_{32}) \Gamma} N \quad (2-13)$$

$$N_2 = \frac{\gamma_{32} \Gamma}{\gamma_{21} (\gamma_{31} + \gamma_{32}) + (\gamma_{21} + \gamma_{32}) \Gamma} N \quad (2-14)$$

وبقسمة المعادلتين (١٣-٢) ، (١٤-٢) نحصل على التعبير الرياضي الذي يعطى النسبة بين N_2 الى N_1 .

$$\begin{aligned}
\frac{N_2}{N_1} &= \frac{\gamma_{32} \Gamma}{\gamma_{21} (\gamma_{31} + \gamma_{32})} = \frac{\Gamma}{\frac{\gamma_{21}}{\gamma_{32}} (\gamma_{31} + \gamma_{32})} \\
&= \frac{\Gamma}{\gamma_{21} \left(1 + \frac{\gamma_{31}}{\gamma_{32}} \right)} \quad (2-15)
\end{aligned}$$

وإذا كانت الإثارة قوية بالقدر الذي تكون فيه :

$$\Gamma > \gamma_{21} \left(1 + \frac{\gamma_{31}}{\gamma_{32}} \right)$$

فإن N_2 تكون أكبر من N_1 وهو شرط حدوث التماكس في إسكان الفرات .

على ذلك فإنه للحصول على التماكس الإسكاني للذرات باستخدام خليط متوسط القيمة ، يلزم أن تكون قيمة γ_{21} صغيرة ، في حين أن قيمة γ_{32} تكون كبيرة بمقارنتها بقيمة γ_{31} .
 يعنى ذلك أنه من المرغوب فيه أن يكون الاسترخاء من المنسوب الأعلى لليزر إلى المنسوب الأدنى له بطيئاً ، في حين أنه يلزم أن يكون الاسترخاء من أعلى المناسيب - وهو المنسوب ٢ الذى أثيرت إليه الذرة فى البداية إلى المنسوب العالى ٢- يلزم أن يكون سريعاً .

يتم حساب التماكس الإسكاني - وقد سبق تعريفه - بأنه ΔN .

حيث $\Delta N = N_2 - N_1$ من المعادلتين (٢-١٣) ، (٢-١٤) كدالة فى شدة الإثارة Γ ،
 وتعتبر عنه المعادلة رقم (٢-١٦) .

$$\Delta N = \frac{\gamma_{32}\Gamma - \gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})}{\gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32}) + (\gamma_{21} + \gamma_{32})\Gamma} N$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\gamma_{32}\Gamma - \gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})}{\gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32}) \left(1 + \frac{\gamma_{21} + \gamma_{32}}{\gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})} \Gamma \right)}$$

$$\Gamma_0 = \frac{\gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})}{(\gamma_{21} + \gamma_{32})}$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\frac{\gamma_{32}}{(\gamma_{21} + \gamma_{32})} \Gamma - 1}{\left(1 + \frac{\Gamma}{\Gamma_0} \right)} \quad (2-16)$$

دعنا نمثل بيانيا تغير $\frac{\Delta N}{N}$ كدالة لشدة الإثارة Γ التى نعبّر عنها بدلالة Γ_0 .

$$\Gamma_0 = \frac{\gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})}{(\gamma_{21} + \gamma_{32})} \quad \text{حيث}$$

وسوف نأخذ حالتين :

$$\gamma_{32} = \gamma_{21} \quad \text{١- عندما تكون}$$

$$\gamma_{32} = 9\gamma_{21} \quad \text{٢- عندما تكون}$$

وفي الحالة الأولى :

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\left(\frac{1}{2} \frac{\Gamma}{\Gamma_0} - 1 \right)}{\left(1 + \frac{\Gamma}{\Gamma_0} \right)}$$

$$\text{For } \frac{\Gamma}{\Gamma_0} = 0, \quad \frac{\Delta N}{N} = -1$$

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_0} = 2, \quad \frac{\Delta N}{N} = 0$$

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_0} = 10, \quad \frac{\Delta N}{N} = \frac{4}{11}$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\left(0.9 \frac{\Gamma}{\Gamma_0} - 1 \right)}{\left(1 + \frac{\Gamma}{\Gamma_0} \right)}$$

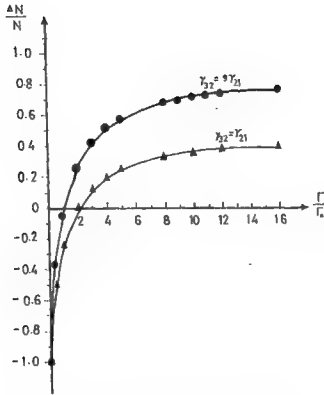
وفي الحالة الثانية :

والجدول الآتي يعطي قيم $\frac{\Gamma}{\Gamma_0}$ المقابلة لقيم $\frac{\Delta N}{N}$ والشكل رقم (٤/٧) يمثل بيانيا

تغير $\frac{\Delta N}{N}$ مع شدة الإثارة $\frac{\Gamma}{\Gamma_0}$ للحالتين المذكورتين (Shimoda 1984) .

جدول رقم (٧/٧)

$\frac{\Gamma}{\Gamma_0}$	0	$\frac{10}{9}$	4	9	19	24
$\frac{\Delta N}{N}$	-1	0	0.52	0.71	0.81	0.82



شكل رقم (٤/٧) : تغير قيمة $\frac{\Delta N}{N}$ بتغير قيمة $\frac{\Gamma}{\Gamma_0}$
 وعندما تصل الإثارة إلى قيمة عالية للغاية نحصل على قيمة ΔN كما يلي :

$$\lim_{\Gamma \rightarrow \infty} \Delta N = \frac{\gamma_{32} N}{(\gamma_{21} + \gamma_{32})} = \frac{N}{\left(1 + \frac{\gamma_{21}}{\gamma_{32}}\right)} \quad (2-17)$$

وفي حالة $\gamma_{32} = \gamma_{21}$ فإن $\frac{\Delta N}{N} \rightarrow \frac{1}{2}$ ، وتصل إلى 0.9 عندما تكون $\gamma_{32} = 9\gamma_{21}$.
 ومن المعادلة رقم (١٧-٢) نستنتج أنه كلما نقصت قيمة γ_{21} وزادت قيمة γ_{32} زاد التعاكس
 الإمكانى الذى تبعاً له ينتج فعل ليزرى أقوى .

التعاكس الإمكانى للذرات فى ليزر المناسيب الأربعة

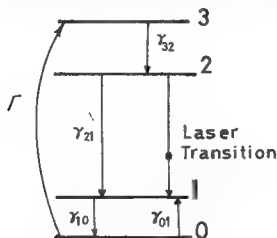
Population inversion in a four level laser

لما كان المنسوب الأدنى للانتقالات الليزرية هو أدنى المناسيب فى ليزر المناسيب الثلاثة ،
 فإن غالبية الذرات تكون فى ذلك المنسوب عند الاتزان الحرارى ، فتكون $N_1 = N$. لهذا

لكى يتم التعاكس الإسكاني للذرات يلزم أنقاص عدد الذرات التى تشغل هذا المنسوب الأدنى إلى أقل من النصف بالضح الشديد . ويقل الالتزام بهذا المطلب كثيرا فى حالة ليزر المناسيب الأربعة .

دعنا نأخذ لرة تحتوى على مناسيب طاقة أربعة كما هو موضح فى الشكل رقم (٢-٥) ، والمطلوب هو الحصول على التعاكس فى إسكان الذرات بين المنسوبين ٢ ، ١ . ولما كان المنسوب الأدنى الليزر الذى نرمز له بالرقم (١) يقع عند طاقة أعلى من $K_B T$ فوق المنسوب الأرضى ٠ ، فإن عدد الذرات التى تم إثارتها حراريا فى المنسوب ١ يكون ضئيلا للدرجة التى يمكن بيسر الوصول إلى تعاكس فى إسكان الذرات عن طريق ضخ عدد صغير نسبيا من الذرات إلى المستوى الأعلى (٢) . ويتم التعبير عن شروط حدوث التعاكس الإسكاني فى هذه الحالة كما يلى :

بالرغم من أن الفرق بين طاقة المناسيب التى نرمز إليها بالأرقام (١) ، (٢) ، (٣) التى يفترض أنها أكبر بقر كبير من $K_B T$ - كما فى حالة ليزر المناسيب الثلاثة - فإن عدد الذرات المثارة حراريا $\gamma_{01} N_0$ من المنسوب الأرضى ٠ - وهو أغنى المناسيب فى عدد الذرات التى تشغله إلى المنسوب الذى نرمز له بالرقم (١) - لا يمكن إهمالها .



شكل رقم (٥/٢) : رسم تخطيطى لمناسيب الطاقة فى نظام المناسيب الأربعة

وتصبح المعادلات التى تصف معدلات الانتقالات بين مناسيب الطاقة فى ليزر المناسيب الأربعة كما يلى :

$$\frac{dN_1}{dt} = \gamma_{01} N_0 - \gamma_{10} N_1 + \gamma_{21} N_2 + \gamma_{31} N_3$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\gamma_2 N_2 + \gamma_{32} N_3 \quad (2-18)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \Gamma N_0 - \gamma_3 N_3$$

$$-\frac{dN_0}{dt} = \frac{dN_1}{dt} + \frac{dN_2}{dt} + \frac{dN_3}{dt}$$

$$\gamma_3 = \gamma_{30} + \gamma_{31} + \gamma_{32} \quad \gamma_2 = \gamma_{20} + \gamma_{21} \quad \text{حيث}$$

ونحصل على حل هذه المعادلات التفاضلية عند الاتزان الحرارى بمساواتها بالصفر كما

$$\gamma_{01} N_0 - \gamma_{10} N_1 + \gamma_{21} N_2 + \gamma_{31} N_3 = 0: \text{ فعلنا في حالة ليترز المناسب الثلاثة}$$

$$-\gamma_2 N_2 + \gamma_{32} N_3 = 0$$

$$\Gamma N_0 - \gamma_3 N_3 = 0$$

$$\therefore N_3 = \frac{\Gamma}{\gamma_3} N_0 \quad (2-19)$$

$$N_2 = \frac{\gamma_{32}}{\gamma_2} N_3 = \frac{\gamma_{32}}{\gamma_2 \gamma_3} \Gamma N_0 \quad (2-20)$$

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{\gamma_{10}} \left(\gamma_{01} + \frac{\gamma_{21} \gamma_{32}}{\gamma_2 \gamma_3} \Gamma + \frac{\gamma_{31}}{\gamma_3} \Gamma \right) N_0 \\ &= \left(\frac{\gamma_{01}}{\gamma_{10}} + \frac{\gamma_{21} \gamma_{32} + \gamma_2 \gamma_{31}}{\gamma_{10} \gamma_2 \gamma_3} \Gamma \right) N_0 \quad (2-21) \end{aligned}$$

ولما كانت $N = N_0 + N_1 + N_2 + N_3$ ، وبالتعويض في المعادلات رقم (٢-١٩) ، (٢-٢٠) ، (٢-٢١) نحصل على :

$$N_0 = \left(\frac{\gamma_{10} \gamma_2 \gamma_3 N}{\gamma_{01} \gamma_2 \gamma_3 + \gamma_{32} (\gamma_{21} + \gamma_{10}) \Gamma + \gamma_2 (\gamma_{31} + \gamma_{10}) \Gamma} \right) \quad (2-22)$$

ومن المعادلتين (٢٠-٢) ، (٢١-٢) نجد أن N_2 تكون أكبر من N_1 عندما :

$$\begin{aligned} \frac{\gamma_{32}}{\gamma_2 \gamma_3} \Gamma_{N_0} &> \left(\frac{\gamma_{01}}{\gamma_{10}} + \frac{\gamma_{21} \gamma_{32} + \gamma_2 \gamma_{31}}{\gamma_{10} \gamma_2 \gamma_3} \right) \Gamma_{N_0} \\ \Gamma \left(\frac{\gamma_{32}}{\gamma_2 \gamma_3} - \frac{\gamma_{21} \gamma_{32} + \gamma_2 \gamma_{31}}{\gamma_{10} \gamma_2 \gamma_3} \right) &> \frac{\gamma_{01}}{\gamma_{10}} \\ \Gamma \left(\frac{\gamma_{32} \gamma_{10} - \gamma_{21} \gamma_{32} - \gamma_2 \gamma_{31}}{\gamma_{10} \gamma_2 \gamma_3} \right) &> \frac{\gamma_{01}}{\gamma_{10}} \\ \therefore \Gamma &> \frac{\gamma_{01} \gamma_2 \gamma_3}{\gamma_{32} \gamma_{01} - \gamma_{21} \gamma_{32} - \gamma_2 \gamma_{31}} \quad (2-23) \end{aligned}$$

هذا هو شرط حدوث التعاكس في إسكان الذرات .

ونلاحظ وجود γ_{01} في بسط المعادلة السابقة وهي احتمال انتقال الذرات المثارة حرارياً من المنسوب 0 إلى المنسوب (١) ، وقيمتها صغيرة كما هو واضح من العلاقة $\gamma_{01} = \gamma_{10} \exp(-W/K_B T)$ وعلى ذلك فإن شدة الإشارة المطلوبة للحصول على التعاكس الإسكاني تقل .

$$\gamma_{21} < \gamma_2 = \gamma_{21} + \gamma_{20} , \quad \gamma_{31} < \gamma_3 = \gamma_{31} + \gamma_{30} + \gamma_{32} \quad \text{ولما كانت}$$

فإنه يمكن تقريب العلاقة (٢٢-٢) كما يلي :

$$\Gamma > \frac{\gamma_{01} \gamma_2 \gamma_3}{\gamma_{10} \gamma_{32}} = e^{-\frac{W_1}{K_B T}} \gamma_2 \left(1 + \frac{\gamma_{31} + \gamma_{30}}{\gamma_{32}} \right) \quad (2-24)$$

$$\gamma_{10} \gg \gamma_2 \quad \text{حيث}$$

ويمقارنة العلاقة (٢٤-٢) بالعلاقة (١٥-٢) لإحداث التعاكس في إسكان الذرات في لينز المناسيب الثلاثة ، نلاحظ أنهما متماثلتان ، إلا في وجود المعامل $\exp(-\frac{W_1}{K_B T})$ في العلاقة (٢٤-٢) . ونظراً لوجود منسوب في نظام المناسيب الأربعة يزيد عن نظام المناسيب

الثالثة - وهو المنسوب الذى نرزم له بالرقم 0 - فإنه من الواضح أن $(\gamma_{21} + \gamma_{20})$ تحل

محل γ_{21} ، γ_{30} ، γ_{31} محل γ_{31}

وهنا يكون العامل $\exp(-\frac{W_I}{K_B T})$ هو العامل الهام والمؤثر ، إذ يمكن الوصول إلى التماكس الإسكانى للذرات حتى ولو كان الضغ ضعيفا إذا ماكان المنسوب الأدنى الذى نرزم إليه بالرقم (١) أعلى من المنسوب الأرضى 0 بقدر من الطاقة لايزيد كثيرا عن بضع مرات من قيمة $K_B T$.

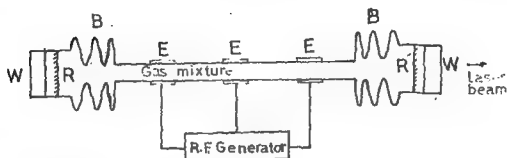
٦/٢ الفعل الليزرى فى ليزر الهيليوم - نيون :

قام " Javan, Bennett & Herriott " عام (١٩٦١) ببناء أول جهاز ليزر . وكان يتكون من أنبوبة تفريغ طولها ١٠٠ سنتيمتر ، وقطرها الداخلى ٥ ، ١ سنتيمتر ، مملوءة بفاز الهيليوم عند ضغط ١ ملليمتر زئبق و بالنيون عند ١ ، ٠ ملليمتر زئبق . واستخدمت مرأتان مستويتان متوازيتان ، وبين الشكل (رقم ٦/٢) مكونات جهاز أشعة ليزر الهيليوم - نيون ، بينما يبين الشكل رقم (٧/٢) المناسيب الرئيسة لفرتى الهيليوم والنيون .

ويمكن أن تصل ذرات الهيليوم عند المنسوب 2^3S بتصادم الإلكترونات ، وهذه الحالة غير مستقرة ، ويغير مسموح حدوث انتقال مباشر ومشع منها إلى المنسوب الأرضى ، وعندما تصطدم ذرات الهيليوم التى تشغل المنسوب 2^3S مع ذرات النيون فى المنسوب الأرضى تتم إثارتها ، ويمكن أن تنتقل الإثارة إلى ذرات النيون التى تصل فى النهاية إلى أحد مناسيب الطاقة $2S$ ، التى يقع أعلاها بفارق 20.0 eV تحت منسوب طاقة الهيليوم 2^3S ، وبين شكل (٧/٢) مناسيب الطاقة لفرتى الهيليوم والنيون .

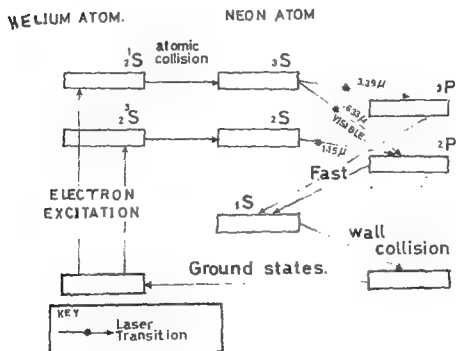
ويمكن أن يحدث انتقال مشع من المناسيب الأربعة التى تكون $2S$ إلى العشرة مناسيب التى تمثل $2P$ ، ويمكن أن ينبعث إشعاع نتيجة انتقال من المناسيب $2S$ لفرى النيون إلى المنسوب الأرضى ، لكن عند ضغط ١ ، ٠ مم زئبق لفاز النيون يتم احتباس هذا الإشعاع تماما ، ويتحدد أعمار الذرات المثارة فى مناسيب الطاقة $2S$ أساسا بالخمود المشع من المناسيب $2P$ ، فهى أطول عمرا من أعمار الذرات فى المناسيب $2P$ وعمرها فى المناسيب $2S$ هو 10^{-7} ثانية فى حين أن أعمار الذرات فى المناسيب $2P$ هى 10^{-8} ثانية لهذا يتم حدوث التماكس الإسكانى للذرات أى الامتصاص السالب بين الانتقالات

المسوحة $2P \rightarrow 2S$ ، فتُخذ الذرات في المناسب $2P$ إلى المنسوب $1S$ غير المستقر ، وينبعث نتيجة ذلك الفوتونات ومنه إلى المنسوب الأرضي نتيجة تصادمها بجدران الأنبوية . لهذا ثبت أن الكسب يتناسب عكسيا مع قطر الأنبوية التي تحوى غازى النيون والهيليوم .



W: windows. B: bellows. R: mirror.
R': partially transparent mirror. E: electrodes.

شكل رقم (٧/٢) : مكونات جهاز أشعة ليزر الهيليوم - نيون



شكل رقم (٧/٢) : المناسب الرئيسية لذرتى الهيليوم والنيون

ولقد حصل « جافان ، بينت ، وهيريوت » على انبعاث مستحث لخمسة أطوال موجية في منطقة الأشعة تحت الحمراء ، أعلاها شدة ضوئية عند ١٥٢٣ ، ١ ميكرون . ويتم ذلك نتيجة انتقالات مستحثة من المناسيب 2 S الى 2 P لذرة النيون ، والإسكان في مجموعة 2 S قد تم إثراؤه بانتقالات من المنسوب 2³S لذرة الهيليوم كما هو موضح في الشكل (٨/٢) .

وقد اكتشف العالمان « هويت وريدجن White & Ridgen » عام (١٩٦٢) الانبعاث المستحث من ليزر هيليوم - نيوم في المنطقة المنظورة التي يحدث نتيجة الانتقال $3S_2 \rightarrow 2P_4$ ، فالإسكان في المنسوب الأعلى قد ازداد نتيجة انتقال الإثارة في المنسوب 2 S لذرة الهيليوم . هذا الشعاع المنبعث من ليزر هيليوم - نيون هو أنسب الأشعة للاستخدام في المحاذاة Alignment ، وطوله الموجي هو ٦٣٢٨ أنجستروم .

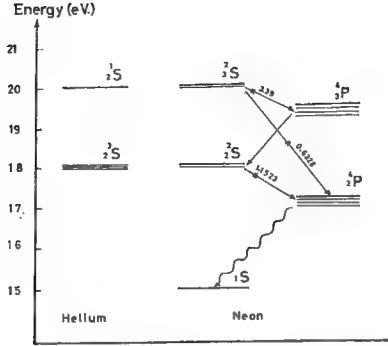
وبعد فترة وجيزة من اكتشاف هذا الشعاع الأحمر ، لاحظ العلماء « بلوم وبل وريمبل Bloom, Bell & Rempell » أن شعاعا في منطقة الأشعة تحت الحمراء بطول موجي أطول من ٢ ميكرون كثيرا ما يصاحب الشعاع المنبعث عند ٦٣٢٨ أنجستروم . هذا الشعاع ينبعث عند المنسوب 3P₄ بطول موجي ٣,٣٩١٣ ميكرون ، وعلى ذلك فإن الفعل الليزدي الرئيسي في نظام الهيليوم - نيون يعزى الى الانتقالات الآتية في ذرة النيون :

$$3S_2 \rightarrow 2P_4 \text{ وينبعث عنه } ٦٣٢٨ \text{ أنجستروم}$$

$$2S_2 \rightarrow 2P_4 \text{ وينبعث عنه } ١١,٥٢٣ \text{ أنجستروم}$$

$$3S_2 \rightarrow 3P_4 \text{ وينبعث عنه } ٢,٢٩ \text{ ميكرون}$$

وبالإضافة الى هذه الأشعة أمكن الحصول على عدد من الانتقالات الضعيفة في ذرة النيون (Lengyel 1966).



شكل رقم (٨/٧) : انتقالات مستحثة في ليزر الهيليوم - نيون

٧/٢- الترابط : Coherence

يمكن وصف ترابط الموجات بمدى دقة تمثيلها بمنحنى يتبع دالة جيب التمام ، وسنعرف هنا نوعين مختلفين من الترابط . يعبر النوع الأول عن العلاقة المتوقعة بين موجة في لحظة ما والموجة بعد فترة زمنية لاحقة ، والنوع الآخر بين نقطة معلومة وأخرى على مسافة معينة منها . ويؤدي النوع الأول إلى مفهوم الترابط الزمني Temporal coherence ، بينما يؤدي النوع الثاني إلى مفهوم الترابط الفراغي Spatial coherence .

الترابط الزمني :

من المعلوم أنه حسب النظرية الكهرومغناطيسية ، فإن ذرات المصدر الضوئي لاتصدر موجات متصلة ، ويكون انبعاث الضوء على هيئة قطارات من الموجات Wave trains ، وتوجد علاقة بين طول هذا القطار والمدى الطيفي لاتساعه النصفى ، وكلما كان القطار طويلا كان المدى الطيفي لاتساعه النصفى قصيرا .

وستتناول مقياس ميكلسون للتداخل الضوئي عند إضاءته بمصدر ضوئي صغير ، والشكل رقم (٩/٢) يوضح قطارا من الموجات الضوئية الساقطة (بين النقطتين A, O) .

وينقسم قطار الموجات عند I إلى قطارين ، أحدهما يسلك المسار (1) والثاني يسلك المسار (2) . ومن الشكل رقم (٩/٢) يتضح أنه إذا كان فرق المسار $(2t)$ أقل من طول قطار الموجات المنبعث من S فإن قطارى الموجات فى المسارين (1) ، (2) ينطبقان ويحدث التداخل بينهما .

وينتشر قطار الموجات المتخذ المسار (2) لمسافة أطول قليلا من قطار الموجات المتخذ المسار (1) . وإزاحة قطار من الموجات بالنسبة للقطار الآخر يساوى الفرق فى المسار الناتج من مقياس التداخل الضوئى .

$$\text{فرق المسار } (P.D.) = 2t$$

وإذا كان فرق المسار (P.D.) صغيرا جدا بالنسبة لطول قطار الموجات ، فإن قطارى الموجات يتطابقان على امتداد معظم طوليها ، وينتج تداخل ضوئى . وتكون هدب التداخل الضوئى حادة خشية العرض ، وهذا هو الترابط الزمنى .

وكما زاد فرق المسار وذلك بتحريك المرأة A إلى اليمين ، فإن مقدار تلاقى الموجات الخارجة من نواصى مقياس التداخل الضوئى يقل ويصبح نموذج التداخل أقل حدة ، وتخفض درجة تباين الهدب ورويتها Visibility .

وعندما يكون الفرق فى المسار $(2t)$ أكبر من طول قطار الموجات ، فإن قطارى الموجات (a_1) ، (a_2) ، اللذين ينبعان من نفس قطار الموجات الأصلى A - لا ينطبقان ولا يحدث تداخل ضوئى . والشكل رقم (١٠/٢) يوضح أنه بالإمكان أن يتلاقى هذان القطاران ، ولكنهما لا ينبعان من نفس قطار الموجات الأصلى حيث A تتبعث فى زمن مختلف عن ذلك الذى تتبعث فيه B ومزاحا منه بمسافة مقدارها t_1 .

وبفرض أن فرق المسار $(2t)$ فى مقياس التداخل الضوئى ذات قيمة بحيث لا يلتقى قطارى الموجات (a_1) ، (a_2) ، حيث (a_1) لا تظهر على الرسم ، الناتجتين من A . وبطريقة مماثلة فإن (b_1) ، (b_2) ، حيث (b_1) لا تظهر على الرسم ، الناتجتين من B لا يلتقيان . بينما يمكن أن يتلاقى قطار الموجات b_1 (الذى يسلك المسار القصير (1) فى مقياس التداخل الضوئى) مع قطار الموجات (a_2) الذى يسلك مسارا أطول . ويمكن أن يعادل التأخر فى

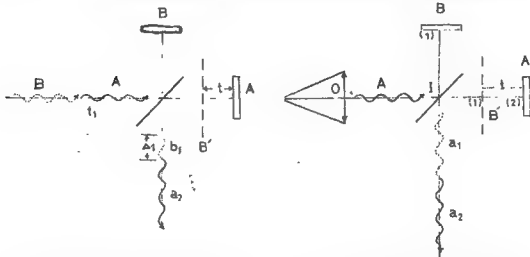
المسار $2t =$ (الذي سببه مقياس التداخل الضوئي) يعادل التأخر المبني t_1 بين القطارين A, B .

والإزاحة بين القطارين b_1, a_2 عندما تخرج من مقياس التداخل هي Δ_1 حيث :

$$\Delta_1 = (t_1 - 2t)$$

فلو كان من الممكن تسجيل هذب التداخل أثناء فترة تواجد قطاري الموجات ، فإنه يمكن رصد هذب التداخل لأن القطارين يتلاقيان وينطبقان . ومن الناحية الواقعية فإن فترة تواجد القطارين صغيرة للغاية عند استخدام المصادر الضوئية العادية ؛ لهذا فملاحظة هذب التداخل لا تتم لقصر فترة تواجدها . ويتم استقبال عدد وفير من قطارات الموجات في الفترة الزمنية المطلوبة لرصد وتسجيل الحدث ، ولما كان انبعاث قطارات الموجات من الذرة المثارة لا يمكن التنبؤ به لأن قيم فرق المسار t_1, t_2, \dots تختلف بطريقة عشوائية مع الزمن ، يحدث هذا أيضا بالنسبة للإزاحات عندما تترك القطارات الموجية مقياس التداخل والتي تكون لها قيم عشوائية $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots$ وسوف يوجد عدد هائل من هذب التداخل المختلفة أثناء الفترة المطلوبة لتسجيل الملاحظة أو الحدث . لهذا سوف لا تظهر هذب للتداخل نقية ، ونحصل على ما يطلق عليه اللاترابط الزمني Temporal Incoherence ، ويسمى طول قطار الموجات بطول الترابط .

وإذا كانت الفترة الزمنية τ هي التي يتواجد فيها القطار ، فإن طول الترابط L يعطى من العلاقة $L = C\tau$ حيث C سرعة الضوء وتسمى τ بـ زمن الترابط .



شكل رقم (١٠/٢) : تلاقى قطارين من الموجات في مقياس ميكلسون للتداخل الضوئي

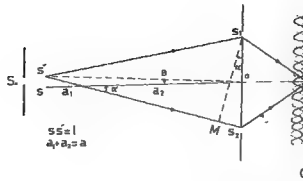
شكل رقم (٩/٢) : مقياس ميكلسون للتداخل الضوئي ويظهر قطار الموجات بين A, O

الترابط الفراغى : Spatial coherence

إذا رجعنا إلى تجربة الشق المزدوج لينج ، فإننا نجد أنه يمكن أن يحدث تداخل من المصادر الضوئية التقليدية بوضع فتحة ضيقة جدا S_0 مباشرة أمام المصدر الضوئى . وهذه الظروف تؤكد أن قطارى الموجات اللذين يخرجان من الفتحتين S_1 , S_2 ينبعان من نفس المنطقة الصغيرة من المصدر الأسمى . والشعاعين اللذين يخرجان من S_1 , S_2 يكونان مترابطين بالنسبة لبعضهما . وأحدث تغير فى طور الموجات المنبعثة من S_0 ، فإن هذا التغير سينتقل فى نفس الوقت إلى كل من S_1 , S_2 ، ولذلك فإنه يوجد فرق طور ثابت - عند أى نقطة على الحائل C- بين الشعاعين المنبعثين من المصدرين ، ويكون نموذج مستقر للتداخل الضوئى .

وإذا زاد عرض الفتحة S_0 بالتدريج فقد وجد تجريبيا أن النهاية العظمى لشدة الضوء (الهدبة المضيئة) على الحائل C تقل والنهاية الصغرى (الهدبة المعتمة) لاتصبح مساوية للصفر . وبعبارة أخرى تقل درجة تباين الهدب . وعندما تزيد S_0 مرة أخرى ، فإن انخفاض قيمة I_{max} وارتداد قيمة I_{min} تقلل من قيمة درجة تباين الهدب ، وتختفى هدب التداخل الضوئى وتظهر مكانها منطقة إضاءتها منتظمة . وتحت هذه الظروف يمكن القول بأن المصدرين S_1 , S_2 قد تحولوا تدريجيا من حالة الترابط الكامل إلى حالة اللترابط incoherence الكامل . ويتضح ذلك من الشكل رقم (١١/٢) .

ولتفسير هذه الظاهرة نجد أنه إذا كانت الفتحة S_0 عريضة بحيث إن أحد الفتحتين S أو S' تضاء غالبا بإشعاع منبعث من مجموعة من الذرات ، أما الفتحة الأخرى فتضاء بإشعاع منبعث من مجموعة أخرى من الذرات ، فإنه بذلك تصبح الفتحتان تمثلان مصدرين غير مترابطين . أما فى حالة أن تكون الفتحة S_0 ضيقة فإن الفتحتين S , S' يتم إضاءتهما بإشعاع منبعث من نفس المجموعة من الذرات .



شكل رقم (١١/٧) : تجربة الشق المزدوج لينج

وحيث إنه يمكن اعتبار أن المصدر الضوئي الممتد extended source يتكون من مصادر نقطية مستقلة ، فإنه من المناسب دراسة حالة مصدرين غير مترابطين ، أحدهما بالنسبة للآخر . افترض أن S' ، S في الشكل رقم (١١/٧) هما موقعا مصدرين غير مترابطين وبما نحسب أقل مسافة بين S' ، S بحيث تكون :

$$S'S_2 - S'S_1 = \frac{\lambda}{2}$$

فإنه لانتظهر هدب تداخل على الحائل C لأنه عند المواقع التي تتكون عندها هدب مضيئة ناتجة من النقب S_1 سوف يتم تكوين هدب مظلمة ناتجة من النقب S_2 .

$$S'S_2 - S'S_1 = S_2M \approx \alpha d$$

$$\alpha = \frac{d/2}{a_2} = \frac{1}{a_1} l = S S' , a_1 = \frac{1}{\alpha} , a_2 = \frac{a_1 d}{1} = \frac{1}{\alpha} \frac{d}{2}$$

$$\therefore a = a_1 + a_2 = \left(1 + \frac{d}{2}\right) \frac{1}{\alpha} \quad \therefore \alpha = \left(1 + \frac{d}{2}\right) \frac{1}{a}$$

$$أي أن (S'S_2 - S'S_1) تساوى تقريبا $\frac{kd}{a}$ ، بافتراض أن $1 \gg \frac{d}{2}$$$

وفي النهاية سوف تختفى هدب التداخل عندما تصل قيمة $\frac{kd}{a}$ إلى $\frac{\lambda}{2}$ ، ويعني ذلك أنه إذا كان مصدر الإضاءة $S'S$ ممتدا فإن الامتداد الفراغي سوف يزيد عن $\frac{\lambda a}{2d}$ ، وسوف لا تظهر هدب تداخل على الحائل .

$$d = \frac{1}{2} \frac{\lambda a}{1} \quad \text{كما أن}$$

$$= \frac{\lambda}{2\theta}$$

حيث θ هي الزاوية التي يحصرها S'S عند O .

وتعرف الكمية $\frac{\lambda}{\theta}$ بأنها اتساع الترابط العرضي ونرمز له I_w .

على ذلك فإنه إجراء تجريبية «ينج» باستخدام شق مزبوج ، يلزم أن تكون المسافة بين الشقين أقل بكثير من اتساع الترابط العرضي للحصول على هدب التداخل . وعند استخدام مصدر إضاءة ممتد ، يدخل بارامتر تتوافق قيمته على شكل المصدر في التعبير عن الاتساع العرضي للترابط I_w ، فإذا كان المصدر دائريا ، فإن الاتساع العرضي للترابط تعطيه العلاقة الآتية :

$$I_w = \frac{1.22\lambda}{\theta}$$

وإذا اخترنا قيمة للفرق المسار L_1 التي عندها يتم تكوين هدب غامض ناتجة من حدى الطول الموجي λ ، $\lambda + \Delta\lambda$ إنما تكون مضبوطة لإحدى الموجتين ومظلمة للأخرى ، فإنه يمكننا اشتقاق علاقة تقريبية تربط L مع $\Delta\lambda$ ، فإذا تكونت هدب مظلمة عند المركز ناتجة من الأشعة التي طول موجتها λ وهدبة مضبوطة ناتجة من الأشعة التي طول موجتها $\lambda + \Delta\lambda$ ، فإننا نحصل على العلاقة $\frac{\lambda^2}{2L} = \Delta\lambda$ واشتقاقها هي كما يلي :

$$L = m\lambda = (m - \frac{1}{2}) (\lambda + \Delta\lambda)$$

$$L = (\frac{L}{\lambda} - \frac{1}{2}) (\lambda + \Delta\lambda)$$

$$2L / (\frac{2L}{\lambda} - 1) = \lambda + \Delta\lambda$$

$$m\lambda = m\lambda + m\Delta\lambda - \frac{1}{2}\lambda - \frac{1}{2}\Delta\lambda$$

$$\lambda = (2m - 1) \Delta\lambda$$

$$2L / (\frac{2L}{\lambda} - 1) = 2m \Delta\lambda$$

$$\therefore \Delta\lambda = \lambda / (\frac{2L}{\lambda} - 1)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L} \text{ if we assume } L \gg \lambda$$

والعلاقة السابقة علاقة تقريبية ، ويمكن الحصول على العلاقة الصحيحة باستخدام تحولات فوريير ، والعلاقة هي : $L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$

حيث L هي طول الترابط ، $\Delta\lambda$ هي عرض خط الطيف أو اتساعه بمقياس الطول الموجي .

نقاء خط الطيف وطول ترابط فوتواته :

يرتبط مفهوم طول الترابط مباشرة بدرجة نقاء خط الطيف ، ويتناظر خط الطيف أحادي طول الموجة تماما مع منحنى جيبي ، ولذلك فتكون قيمة τ له لانهائية . ولكن يوجد لأي خط طيف حد أقصى للمسافة الفاصلة بين المرأتين ، بعدها لا يمكن أن يحدث تداخل . ويمكن تفسير ذلك بأنه ينبعث من المصادر أحادية الطول الموجي أطوالا موجية موزعة باستمرار بين λ و $\lambda + \Delta\lambda$ ، وعندما يكون فرق المسار صغيرا فإن هذب التداخل الضوئي الدائرية لجميع الأطوال الموجية المشاركة تكون عمليا متطابقة . ولكنه بزيادة فرق المسار فإن معدل انفراج الدوائر ومعدل إنتاج هذب جديدة هي المركز يختلفان لكل طول موجي بين λ و $\lambda + \Delta\lambda$.

وكذلك فإنه يتضح أن مدى التردد $\Delta\nu$ يتناسب عكسيا مع زمن الترابط τ ، أو Δt ، ويتبع العلاقة : $\tau \Delta\nu \approx 1$

وطبقا لذلك فإنه لإجراء تجربة تداخل ضوئي يستخدم فيها الشق المزدوج - كما هي تجربة ينج - يجب أن تكون المسافة بين الفتحتين أقل من طول الترابط العرضي ، وذلك للحصول على هذب تداخل ضوئي مميزة . والشكل رقم (١٢/٢) يوضح هذا المفهوم ، وقطارات الموجات مبينة على هيئة منحنيات جيبيية ، والمنحنيات الموجودة على الجانب الأيمن توضح المكونات الطيفية للضوء المقابلة لهذه القطارات . وإذا كان فرق المسار $(2t)$ أكبر من طول الترابط ، فإن قطارات الموجات لاتتطابق ولايحدث تداخل ضوئي . ويمكن الوصول إلى الاستنتاجين الهامين الآتيين :

أ- لكي يمكن رؤية نموذج التداخل الضوئي الناتج من المصادر الضوئية ، لا بد أن يكون فرق المسار الضوئي في مقياس التداخل أقل من طول الترابط للمصدر .

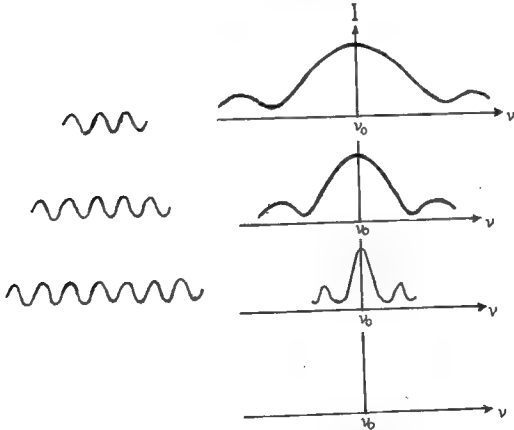
ب- تصبح هدب التداخل الضوئى أكثر حدة كلما قل فرق المسار الضوئى فى مقياس التداخل وذلك بالنسبة لطول الترابط الضوئى المصدر ، والتردد ν_0 هو متوسط تردد الموجات المنبعثة . وعند الحد النظرى ينبعث قطار لانهائى من الموجات يتكون من ضوء احادى طول الموجة ترددها ν_0 .

والشكل رقم (١٢/٢) يوضح العلاقة بين طول قطار الموجات وطيف الضوء المنبعث .

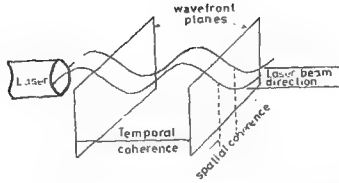
والشكل رقم (١٣/٢) يوضح الترابط الفراغى والترابط الزمنى لشعاع من الليزر .

ومكونات الترابطين هى جزء من رسم ذى أربعة أبعاد تصف تماما درجة ترابط شعاع الليزر . وبالنسبة لمصدر دائرى ، ولدى أوزن الترابط coherence interval ، يعطى حجم الترابط coherence volume من المعادلة :

$$\text{Coherence volume} = L \cdot l_w = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \cdot \frac{1.22\lambda}{\theta}$$



شكل رقم (١٢/٢) : العلاقة بين طول قطار الموجات وطيف الضوء المنبعث



شكل رقم (١٢/٧) : الترابط الفراغي والترابط الزمني لشعاع من الليزر

٨/٢- الكثافة الضوئية لشعاع الليزر : Optical density of a laser beam

التوزيع الفراغي لشعاع الليزر : Spatial distribution of a laser beam

يتبع بروفيل الشدة الضوئية لشعاع TEM₀₀ منحنى توزيع جاسوس ويحكم بواسطة تأثيرات العيود التي تحدث عند الحواف ، والمعادلة الآتية تعبر عن توزيع الشدة الفراغية spatial intensity لهذا النمط :

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2 / w^2)$$

حيث r هي المسافة مقاسة من مركز الشعاع ، w هي ثابت يعرف متوسط نصف قطر الشعاع ، ويسمى spot size حيث نقل الشدة إلى $\frac{1}{e^2}$ من قيمة أعلى شدة للشعاع عند مركز التوزيع .

ويظل هذا الشكل محتفظا به عند مرور الشعاع خلال الفراغ ويعانى من زيادة في اتساع عرضه وتشويه نتيجة العوامل الجوية . وعند النقطة $\frac{1}{e^2}$ نقل الشدة إلى ٨٦,٤٧ % .

ويعبر عن انفرج الشعاع beam divergence بوحدات الملى ريدينز ($\Phi = \frac{S}{r} \text{rad.}$) milli-radians . والزاوية Φ معبرا عنها بالوحدات القطرية تساوى طول القوس S الذى يقابل المركز والمحدد بالشعاعين مقسوما على نصف القطر r .

زاوية نصف قطرية واحدة $= \frac{180}{\pi} = 57.3^\circ$.

ويعبر عن أقل انقراج للشعاع بالمعادلة :

$$\Phi = \frac{4\lambda}{\pi D}$$

حيث D هي أقل عرض للشعاع .

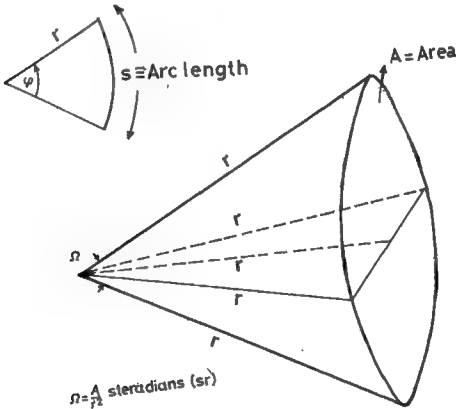
وامتد هذا المفهوم إلى الثلاثة أبعاد وذلك بإدخال الزاوية المجسمة Ω معبرا عنها بوحدة

الاستراديان (sr) (حيث $\Omega = \frac{A}{r^2}$ كما هو موضح بالشكل رقم ١٤/٢) .

واسطح نصف كرة فإن الزاوية المجسمة Ω تغطي من المعادلة .

$$\Omega = \frac{A}{r^2} = \frac{2\pi r^2}{r^2} = 2\pi \text{ sr.}$$

وينحصر الشعاع الخارج من جهاز الليزر في زاوية أقل من 10^{-6} استراديان (sr).



شكل رقم (١٤/٢) : الزاوية المجسمة معبرا عنها بوحدة الاستراديان (sr)

٩/٢- شدة شعاع الليزر : Intensity of laser beam

تعتمد شدة شعاع الليزر على قدرة الشعاع ومساحة مقطعة ، والطريقة التي ينتشر بها من نقطة إلى أخرى في الفراغ . وتعرف القدرة بأنها المعدل الزمني لفعل الشغل ، وهي معدل استخدام أو إنتاج الطاقة . والعلاقة بين الطاقة والقدرة والزمن تعطىها المعادلة :

$$\Phi = \int_0^{\tau} P(t) dt$$

معبرا عن الكميات بوحدات الراديومترية radiometric units كالآتي :

Φ = الطاقة بالجول .

p (t) = القدرة بالوات .

dt = الزمن بالثانية .

τ = زمن تكرار النبضة pulse duration بالثانية .

وإذ أن فلان واحد وات يكافئ واحد جول / ثانية ، وشدة شعاع الليزر يعبر عنه بـ irradiance بالمعادلة الآتية :

$$\frac{\text{Power}}{\text{area of the beam}} = \frac{\text{average value of beam power}}{\text{average value of beam cross-section}}$$

وذلك بوحدات وات / سم^٢ . ويقيم شعاع الليزر المستمر بوحدات الوات أو المللي وات ، ويقيم الليزر النبضي بالطاقة الكلية معبرا عنها بوحدات جول / نبضة .

وبيضا الشدة I تساوى عدد الفوتونات الساقطة على وحدة المساحات في الثانية ، فإن كثافة الطاقة energy density أو energy optical density تساوى عدد الفوتونات في وحدة الحجم في الثانية ، وإذ أن فلان :

$$\text{energy density} = \frac{1}{c}$$

حيث c هي سرعة الضوء لنفس مدى التردد .

طول الترابط لمصدر إضاءة ، درجة تباين الهدب وأقصى فرق مسار

Coherent length of illuminating source, fringe visibility and maximum path difference :

توزيع الشدة الضوئية في هدب التداخل الضوئي الثنائي مأخوذاً في الاعتبار عرض خط الطيف المستقيم كمصدر إضاءة :

من المعلوم أنه في حالة ضوء أحادي طول الموجة فإن توزيع الشدة الضوئية لهدب التداخل الضوئي الثنائي تعطىها المعادلة :

$$I = 4 a^2 \cos^2 \frac{\Delta}{2}$$

حيث a هي سعة كل من الموجتين المتداخلتين ، Δ هي فرق الطور بينهما .

لندرس حالة مقياس التداخل الضوئي لميكلسون ، ولنفترض أن المرآة نصف المفضضة تقسم سعة الأشعة السابقة إلى جزئين متساويين A_0 ، أحدهما يتجه إلى المرآة المرجع والآخر يتجه إلى المرآة الأخرى ويفرض أن خط الطيف متجانس ومنتظم حول منتصفه ونعرض نصفى $\Delta \sigma$ نتيجة لتأثير دوبلر ، فإن الشدة الضوئية I_0 للأشعة المنبعثة ذات التردد ν - إذا كان المصدر يعانى فقط من تأثير دوبلر - تعطىها العلاقة :

$$I_0 = e^{-\alpha(\nu - \nu_0)^2} \text{ and } \Delta \sigma = 2 \sqrt{\frac{0.69}{\alpha c}}$$

وتوزيع الشدة الضوئية لهدب التداخل تعطىها المعادلة (٢-٧) حيث :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A_0^2 \cos^2 \left(2 \pi \nu \frac{D}{2c} \right) d \nu \quad (2.25)$$

$A^2 = I_0$ شدة الأشعة الساقطة .

D = فرق المسار بين شعاعين متداخلين .

c = سرعة الضوء .

$$I = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha(v-v_0)^2} (1 + \cos 2\pi v \frac{D}{c}) dv$$

ولإجراء التكامل نضع $(v - v_0) = X$

$$dv = dx$$

$$I = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} [1 + \cos 2\pi (v_0 + x) \frac{D}{c}] dx$$

$$= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} dx + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} [\cos 2\pi \frac{D}{c} v_0 \cos 2\pi \frac{D}{c} x$$

$$- \sin 2\pi \frac{D}{c} v_0 \sin 2\pi \frac{D}{c} x] dx$$

$$I = \cos 2\pi \frac{D}{c} v_0 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} \cos (2\pi \frac{D}{c} x) dx$$

$$- \sin 2\pi \frac{D}{c} v_0 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} \sin (2\pi \frac{D}{c} x) dx$$

وإذا كانت الدالة $F(x)$ متجانسة حول المركز v_0 وكانت هذه الدالة أحادية فإن :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \sin b x dx = 0$$

$$\therefore \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} \sin (2\pi \frac{D}{c} x) dx = 0$$

$$I = \cos 2\pi \frac{D}{c} v_0 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} \cos (2\pi \frac{D}{c} x) dx$$

ولكننا نعلم أن :

$$\int_0^{+\infty} e^{-\alpha x^2} \cos b x dx = \sqrt{\frac{e}{\pi}} \frac{1}{2\alpha} - \frac{b^2}{4\alpha^2}$$

$$\begin{aligned}
I &= 2 \cos 2 \pi \frac{D}{c} v_0 \int_0^{+\infty} e^{-\alpha x^2} \cos \left(2 \pi \frac{D}{c} x \right) dx \\
&= 2 \cos 2 \pi \frac{D}{c} v_0 \left[\sqrt{\pi} \frac{e^{-\frac{4 \pi^2 D^2}{4 \alpha c^2}}}{2 \sqrt{\alpha}} \right] \\
&= \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\alpha}} e^{-\frac{4 \pi^2 D^2}{4 \alpha c^2}} \cos 2 \pi \frac{D}{c} v_0 \\
\therefore I &= \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\alpha}} \left[1 + e^{-\frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}} \cos 2 \pi \frac{D}{c} v_0 \right] \quad (2.4)
\end{aligned}$$

هذه هي المعادلة التي تعطى توزيع الشدة الضوئية في هدب التداخل الضوئي الثنائي ،
أخذين في الاعتبار عرض خط الطيف كمصدر للضوء . وهذه هي الحالة التي فيها يتبع
توزيع الطول الموجي المنبعث من المصدر بروفييل دويلر ، وبالتالي يتبع بروفييل التردد
للموجات توزيع جاوس .

The visibility of : $\frac{1}{2}$ - درجة تباين هدب التداخل الضوئي الثنائي
two-beam fringes

عرف « فيزو Fizeau » درجة تباين الهدب (V) بالمعادلة الآتية :

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

وهي تساوي الواحد الصحيح في حالة هدب التداخل الضوئي الثنائي بافتراض أن
الضوء أحادي طول الموجة تماما ، أي ليس له اتساع طيفي نظريا . وهذا يعني أن درجة
تباين الهدب تظل ثابتة مع زيادة فرق طول المسار . ولكن بوجود خطوط طيفية ذات عرض
محدد ، فإن تغير درجة تباين الهدب مع فرق المسار D يعتمد على عرض خط الطيف . وقد
درس « ميكلسون » تأثير عرض خط الطيف على درجة تباين الهدب الناتجة في مقياس
ميكلسون للتداخل الضوئي .

وقد وجد أن الخط الأحمر في طيف الكاديوم يتمتع ببروفيل طيفي يتبع توزيع دويلر ،
 أى أنه يعاني من تأثير دويلر دون العوامل الأخرى التي تسهم في اتساع خط الطيف ،
 وأمكنه قياس عرضه الطيفي .

وقدم Terrien ١٩٥٧ ، ١٩٦٠ علاقات بين درجة تباين الهدف في حالة التداخل الضوئي
 الثنائي وعددا من الخصائص الطيفية لأضواء أحادية الطول الموجي ، والنتائج العملية
 لقياس درجة تباين الهدف وتفسيرها من الوجهة الطيفية . وقد درس درجة التباين في حالة
 البروفيل المنتظم كبروفيل دويلر الناتج من تأثير درجة الحرارة على حركة الذرات المثارة ،
 بروفيل الرنين وبروفيل دويلر والامتصاص الذاتي مجتمعين . وقد استخدم في تجاربه
 العملية مصدرى إضاءة ، هما نظير الكريبتون ٨٦ ونظير الزئبق ١٩٨ .

وبالتعويض في المعادلة (٢-٢٥) التي تعطى توزيع الشدة الضوئية في هدف التداخل
 الثنائي ، نحصل على العلاقة بين درجة التباين V وفرق المسار D واتساع أو عرض خط
 الطيف إذا كانت الأشعة الضوئية التي تضيئ مقياس التداخل تتبع توزيع جاوس لتردداتها
 أى تعاني فقط من ظاهرة دويلر .

$$\therefore I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left[1 + e^{-\frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}} \cos 2\pi \frac{D}{c} v_0 \right]$$

$$I_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left[1 + e^{-\frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}} \right], \text{ and}$$

$$I_{\min} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left[1 + e^{-\frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}} \right]$$

$$V = e^{-\frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}}$$

وطبقا لما اقترحه « فيز » فإنه يمكن اعتبار قيمة V تساوى ٢٪ ، وهى أقل قيمة للتباين
 تسمح برؤية الهدف وإجراء قياسات عليها .

$$\text{For } V = 0.02, \quad \frac{\pi^2 D^2 m}{\alpha c^2} \approx 3.913$$

ولكن:

$$(\Delta \sigma)^2 = \frac{2.7726}{\alpha c^2}$$

نتيجة تأثير دوبلر حيث D_m هو فرق المسار المقابل لدرجة تباين V مقدارها $= 0.2$.

$$\Delta \sigma D_{v=0.02} = 1.048$$

وإذك فإن أقصى فرق مسار يمكن عنده الحصول على هدب تداخل ضوئي ثنائي في مقياس ميكلسون ، أي أن أقصى طول للنبود القياس العيارية التي تحصر طولاً محدداً بين طرفين مستويين متوازيين تعطيه العلاقة :

$$D_m = \frac{1.048}{\Delta \sigma}$$

ويمكن أن نستنتج من هذه العلاقة أنه في حالة خط طيفي له بروفيل دوبلر :

أ- تقل درجة تباين الهدب بانتظام مع فرق المسار D للخط المفرد singlet حسب المعادلة .

$$V = c \cdot \frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}$$

$$= c \cdot \frac{\pi^2 D^2 (\Delta \sigma)^2}{2.77}$$

ب- فرق المسار D يتناسب عكسياً مع العرض النصفى $\Delta \sigma$ للخط الطيفي المستخدم كمصدر إضاءة .

وتم عملياً تعيين درجة تباين هدب التداخل الضوئي المكونة عند مسافة معينة من مستوى ثابت كمرجع ، وقد استخدم مصباح نظير الزئبق ١٩٨ وضبطت درجة الحرارة عند 20°م باستخدام منظم لدرجة الحرارة وتم التشغيل عند تردد ثابت $190 - 210$ ميجاسيكل / ثانية ، واختير خط الطيف الأخضر ذو طول الموجة $670, 680$ أنجستروم .

وبالتعويض في المعادلة التي سبق اشتقاقها لخط طيفي له بروفيل جاوس فقط وبدون امتصاص ذاتي ، أي $(\Delta \sigma \cdot D_m = 1.048)$ بقيمة D_m التي استنتجت من المنحنى بين D, V وجد أن :

$$\text{العرض النصفى } \Delta\sigma = \frac{1.048}{0.4} \text{ لمصباح نظير الزئبق } ^{198}\text{Hg} \\ \text{أى أن } \Delta\sigma = 0.019 \text{ سم}^{-1}$$

ويمكن حساب العرض النصفى $\Delta\sigma$ فى حالة $D_{1/2}$ ، أى فرق المسار الذى يصل عند درجة تباین الذهب V_0 المعينة عند فرق مسار = صفر إلى نصف قيمتها ، وذلك بالتعميـض فى المعادلة (٢-٢٥) بقيمة $V = 0.05$ عند $D = D_{1/2}$ ونحصل على $D_{1/2} = 0.44$ هذه العلاقة قد حصل عليها "Valasek" عام (١٩٤٩) ، وأفاد بالقيم الآتية لمصباح نظير الزئبق ^{198}Hg $D_{1/2} = 24.8 \text{ cm}$ ، $\Delta\sigma = 0.017 \text{ cm}^{-1}$ لدرجة من الدقة 0.002 cm^{-1} عند 22°C .

وأفاد "Barell" عام (١٩٥١) بالقيمة 0.0156 cm^{-1} عند درجة 17°C .

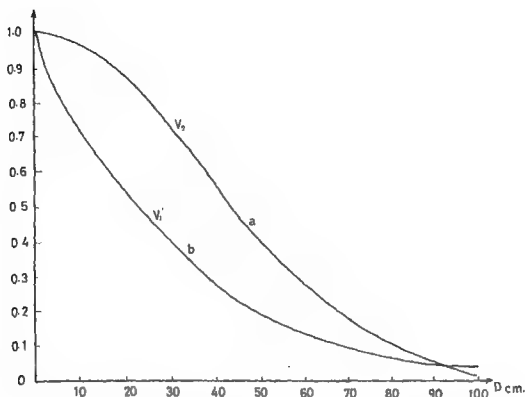
وتم تعين طول الترابط L_c لمصباح نظير الزئبق ^{198}Hg عام (١٩٨٨) -Sharaf and Amer- باستخدام مقياس التداخل المقارن للعالم الألمانى "Köster" ، وهو المقياس المناسـب لقياس ومعايرة قنود القياس المصنوعة من الصلب والتي لها طرفان مستويان ضوئيان ومتوازيان ، وكانت النتيجة هى 0.8 سم .

أما فى حالة مصدر ضوئى تعانى أشعته من اتساع طيفى ناتج من الضغط داخل أنبوية المصدر ، فإن بروفيله يتبع توزيع لورنتز ، والعلاقة الآتية تعطى درجة التباين للذهب الناتجة من التداخل الضوئى الثانى فى هذه الحالة :

$$V = e^{-\frac{\pi \Delta V L}{C}} = e^{-\pi D \Delta\sigma}$$

حيث D هو فرق المسار بوحدات السنـتيمتر ، $\Delta\sigma$ هى العرض الطيفى النصفى بوحدات cm^{-1} .

ويبين الشكل (١٥/٢) منحنيات التباين مع فرق المسار D لذهب التداخل الناتجة فى حالتى مصدرين ، يتبع أولهما توزيع جاوس والثانى توزيع لورنتز .



شكل رقم (١٥/٢) : تغير درجة التباين مع فرق المسار D لهذب التداخل الناتجة في حالتي مصدرين :
(a) تتبع توزيع جالوس (b) تتبع توزيع لورنتز

References

- Barrell H 1951 Proc. Roy Soc A 209 132
 Fowles G R 1968 Introduction to Modern Optics (New York : Holt, Rinehart and Winston Inc) pp 262-284.
 Javan A, Bennet W R and Herriott D R 1961 Phys Rev Letters 6 106.
 Lengyel B A 1966 Introduction to Laser Physics (New York : John Wiley)
 Sharaf F and Amer A 1993 Optics and Laser Technology (in press).
 Shimoda K 1984 Introduction to Laser Physics (Berlin : Springer-Verlag).
 Terrien J 1960 Symposium No 11 Interferometry H.S.O. p 437.
 Terrien J, Hamon J and Masui T 1957 C.R. Acad Sci 245, 960.
 Valasek J 1949 Introduction to Theoretical and Experimental Optics (Chapman & Hall) p. 144.

الفصل الثالث

مقدمة عن تركيب الألياف

An Introduction to Fibre Structure

يتناول الفصل الثالث الموضوعات الآتية : طرق فحص تركيب الألياف ، الخصائص الضوئية المتباينة Optical anisotropy للألياف الطبيعية والتركيبية والألياف المرتبة جزئياتها ترتيباً منتظماً تلك التي تتميز بقيمة عالية للانكسار المزدوج highly oriented fibres ، والتركيب الطبقي للألياف التركيبية والألياف البصرية .

١/٣- طرق فحص تركيب الألياف :

Methods of investigating the structure of fibres

فيما يلي قائمة بالطرق المختلفة المستخدمة لهذا الغرض :

- أ- الميكروسكوب الضوئي ،
- ب- الميكروسكوب الإلكتروني الماسح .
- ج- الميكروسكوب الإلكتروني النافذ .
- د- حيود الأشعة السينية .
- هـ- أطيف الأشعة تحت الحمراء .
- و- التداخل الضوئي الثنائي ،
- ز- التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس .

ويمكن للقارئ عند استخدام الميكروسكوب الضوئي والميكروسكوب الإلكتروني أن يرجع إلى المراجع في هذه المجالات مثل : Stoves (1957), Françon (1961), Meredith and Hearle (1959), and Wells (1974)

ويتميز الميكروسكوب الإلكتروني الماسح بقوة تحليل فراغية spatial resolution كبيرة وعمق مجاله depth of field ، ولذلك فإنه يوفر معلومات تفصيلية عن المعالم التركيبية

للألياف ، ويمكن الحصول على معلومات عن بروفيل معامل الانكسار بالنسبة للألياف البصرية بتعريض إحدى نهايتي الشعيرة للتآكل etching باعتبار أن معدله يعتمد على مكونات الشعيرة في المواضع المختلفة .

وعندما يزود الميكروسكوب الإلكتروني الماسح بمطياف الأشعة السينية القادر على فصل مناسب الطاقة ، يمكن الحصول على معلومات كمية عن التأثيرات الناتجة من التغيرات في تركيب الشعيرة من المرجعين الآتين : - (Wells (1974) & Kita et al, (1971) .

وبمقارنة خصائص شدة الأشعة السينية الناتجة من فحص شعيرة لعينة عيارية ، يمكن تعيين مكونات الشعيرة من العناصر التي لايزيد رقمها الذري عن الرقم الذري للبريليوم (Burris et al., 1973) .

وسوف يتناول الفصلان الخامس والتاسع نظرية النظم البصرية للتداخل الضوئي الثنائي وتكوينها وأنواع ميكروسكوبات التداخل وتطبيقاتها لتعيين الخواص الضوئية للألياف المستخدمة في المنسوجات وكذلك للألياف البصرية المستخدمة في التراسل الضوئي .

كما سيتناول الفصل السادس نظرية هيب التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس وتكوينها وخصائصها وتطبيقاتها لتعيين الخواص الضوئية للألياف الطبيعية والتركيبية والبصرية .

٢/٢- تباين الخواص الضوئية في الألياف :

Optical anisotropy in fibres

١/٢/٣- الألياف الطبيعية والتركيبية : Natural and synthetic fibres

عندما يمر شعاع ضوئي أحادي طول الموجة ومستقطباً استوائياً خلال نظام من الجزئيات المرتبة ، فإنه يعاني انكساراً ، نتيجة تفاعل الضوء مع المادة . ويختلف هذا التفاعل باختلاف الاتجاه الكهربى electric vector للشعاع الضوئي الساقط والمستقطب استوائياً . ولهذا المنجأ الكهربى اتجاهان هما :

١- في اتجاه محور الشعيرة .

٢- في الاتجاه العمودى عليه .

وتعرف المادة في هذه الحالة بأنها متباينة الخواص الضوئية optically anisotropic ويكون لها انكسار مزدوج - أى قيمتان لمعامل الانكسار ، أحدهما للضوء المستقطب في اتجاه مواز لمحور الشعيرة والآخر في الاتجاه العمودي عليه - ويقاس الانكسار المزدوج birefringence بالفرق بين قيمتي معاملي الانكسار المذكورين . وتتركب الألياف الطبيعية والتركيبية من جزيئات انتظمت في سلاسل طويلة ، تقع على امتداد محور الشعيرة ، وتكون السلاسل في بعض الألياف موازية تماما في أغلبها للمحور ، وتفقد هذه الصفة في ألياف أخرى .

وتختلف الخصائص الضوئية للألياف باختلاف اتجاه انتشار الأشعة بالنسبة لمحور الشعيرة ، ويصل الاختلاف في هذه القيم إلى الحد الأقصى عند استخدام ضوء مستقطب في اتجاه مواز للمحور وفي الاتجاه العمودي عليه ، وتوجد علاقة مباشرة بين الخصائص الضوئية للألياف والخصائص الضوئية للجزيئات المكونة لهذه الألياف ، إذ أن التفاعلات الداخلية بين الجزيئات المتجاورة المكونة لهذه الألياف ضئيلة للغاية ويكون معامل انكسار مادة الشعيرة للضوء المستقطب في أى اتجاه مساويا لمجموع خصائص الجزيئات المكونة لهذه الألياف في نفس الاتجاه (Bunn, 1949) ودراسة الخواص الضوئية للألياف يستخدم ضوء مستقطب في اتجاه مواز لمحور الشعيرة وكذلك في الاتجاه العمودي عليه ، وتوجد عدة طرق لتعيين معامل انكسار الألياف من بينها طريقة الحد الفاصل لبك (Becke line) وطرق التداخل الضوئي .

وتعطي طريقة الحد الفاصل لبك معامل انكسار القشرة الخارجية للشعيرة التي قد تختلف في تركيبها عن الأجزاء الداخلية للشعيرة (Hartshorne and Stuart, 1970) ، وفي طريقة بيك تفسر الشعيرة في سائل معروف معامل انكسار مادته يوضع على شريحة زجاجية ، ويظهر خط مضئ عند الحد الفاصل للشعيرة والسائل . وبملاحظة هذه الظاهرة بميكروسكوب ضوئي نجد أن هذا الخط المضئ يتحرك في اتجاه الوسط ذو معامل الانكسار الأعلى وذلك عند رفع العدسة الشيئية للميكروسكوب قليلا ، أى بزيادة البعد بين الشعيرة والعدسة الشيئية . ويمكن دراسة أنواع الألياف المختلفة والتي لها معاملات انكسار متباينة باستخدام مجموعة سائل لها معاملات انكسار عيارية . ويختفى الخط المضئ عندما

يتمسوى معامل انكسار السائل والشعيرة ، ويسمى هذا السائل بسائل المضاهاة matching liquid ويعين معامل انكسار الشعيرة للضوء المستقطب أحادى طول الموجة المستخدم . والانكسار المزدوج للألياف (birefringence Δn) يساوى الفرق بين معاملي الانكسار n^{\parallel} في اتجاه محور الشعيرة ، n^{\perp} في الاتجاه العمودى عليه :

$$\Delta n = n^{\parallel} - n^{\perp}$$

ويطبق طرق التداخل الضوئى الثنائى والمتعدد - التى سنتناولها فى الفصلين الخامس والسادس - يمكن تعيين معاملات انكسار لب الشعيرة core وقشرتها cladding ، وكذلك معاملات الانكسار المزدوج لها Δn_c ، Δn_g لب الشعيرة وقشرتها على الترتيب .

وقدم "Kuhn and Grün" ١٩٤٢ أول نظرية تربط بين التركيب الجزيئى للبولمرات أحادية المحور البصرى uniaxially oriented polymers وخصائصها الضوئية الناتجة من تباين خصائصها التركيبية . وعند سحب الألياف التركيبية من مصهور بعض البولمرات من طريق الاتباق من ثوب دقيقة يتم تكوين هذه الألياف وتكون فى أغلبها متماثلة isotropic الخواص الفيزيائية ، ومعنى ذلك ثبوت خصائصها وعدم تغيرها مع الاتجاه داخل الشعيرة ، ثم يتم سحب هذه الألياف ميكانيكيا للحصول على ألياف قوية تصلح للاستخدام فى الأغراض الصناعية ، وتكتسب هذه الألياف المسحوبة خصائص ضوئية وميكانيكية غير متماثلة (anisotropy) ، وتعتمد درجة عدم التماثل على مقدار الشد المستخدم فى السحب . وتعطى قيم معاملات الانكسار المتوسطة n_g^{\parallel} ، n_g^{\perp} والانكسار المزدوج المتوسط Δn_g للألياف معلومات هامة ومميزة يتم على أساسها توصيف هذه الألياف .

معاملات الانكسار واستقطابية الروابط الكيميائية

Refractive indices and bond polarisability

إن لتعيين الخواص الضوئية المتباينة للألياف أهمية كبيرة ، حيث تقدم هذه الخواص معلومات عن درجة انتظام الجزيئات بالنسبة لمحور الشعيرة ، ويؤدى ذلك إلى التعرف على تأثير المعاملات الكيميائية والميكانيكية على الألياف وتقييمها . ولهذه المعلومات ارتباط كبير فى ابتكار طرق حديثة لضبط الجودة فى كثير من الصناعات . ولقد قدم "Denbigh"

١٩٤. طريقة لتقييم الخواص المتباينة للجزيئات molecular anisotropy تعتمد على مفهوم استقطابية الروابط الكيميائية وعلى حساب القيمة الاستقطابية لكل رابطة في جميع أنواع الروابط الكيميائية الموجودة في تركيب معين ، وفي معالجته لهذا الموضوع اعتبر "Denbigh" أن كل رابطة كيميائية لها استقطابيتها ، وأن استقطابية الجزيئات هي حصيلة تجميع إسهام جميع هذه الروابط . وتسمح هذه الطريقة بحساب معامل الانكسار لمركب ما ، ولا يجمع متوسط استقطابية كل رابطة عندما تكون لها اتجاهات مختلفة كما هو الحال في البلورات متباينة الخواص anisotropic ، إذ أنه من الضروري في هذه الحالة إدخال الاختلاف في الاتجاه في الاعتبار باستخدام مجسم على شكل قطع ناقص يور حول أحد محوريه الأساسيين ellipsoid polarisability .

وتعطي المعادلة الآتية - Bunn, 1961 - الاستقطابية α في اتجاه معين لـ ellipsoid polarisability لجزيئ متعدد الذرات :

$$\alpha = \sum \alpha_L \cos^2 \theta + \sum \alpha_T \sin^2 \theta$$

وتجمع لكل الروابط . حيث θ هي الزاوية بين الرابطة والاتجاه المعين ، α_L ، α_T هما الاستقطابية الطولية والعرضية على الترتيب .

وتطبق هذه المعادلة على حالة بلورة حيث يمكن حساب الاستقطابية في اتجاه أساسي . وبحسب معامل الانكسار في هذا الاتجاه من الاستقطابية باستخدام معادلة Lorentz :
Lorenz

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{M}{d} = \frac{4}{3} \pi N \alpha_K$$

حيث n معامل الانكسار المناسب n^{\parallel} أو n^{\perp} أو M الوزن الجزيئي لكل وحدة طول ، d كثافة المادة ، N عدد أفوجادرو ، α_K معامل الاستقطابية لوحدة كاملة متكررة في سلسلة البوليمر .

واقد حسب "Hamza and Sikorski" (١٩٧٨) معاملات الانكسار والانكسار المزوج لألياف الـ Poly (p-phenylene terephthalamide) (PPT) باستخدام النموذج الجزيئي لهذا البوليمر الذي قدمه "Northolt" (١٩٧٤) وقيم استقطابية الروابط الكيميائية التي قدمها "Denbigh" (١٩٤٠) و "Bunn and Daubeny" وذلك بالتعويض في صيغة Lorentz-Lorenz .

٢/٢- الألياف التي انتظمت أغلب جزيئاتها في سلاسل موازية لمحور

الشعيرة : Highly oriented fibres

تتبع الألياف الـ PPT المذكورة في الفقرة السابقة مجموعة الألياف المرتب أغلب جزيئاتها ترتيباً منتظماً ، وبالتالي تتميز بقيم عالية للانكسار المزدوج . ويمكن للشعيرة التي لها معامل إجهاد tensile modulus أعلى من 40 GN m^{-2} أن تصنف على أنها ألياف ذات ترتيب عال الجزيئات ، ويتضح طبقاً لهذا التحديد أن الألياف النسيج الثقيلية والمتضمنة ألياف النايلون ذات قوة الشد العالية high-tenacity ، والألياف البولى استر لا تدخل ضمن هذه المجموعة من الألياف .

وتعطي الدراسات التي قدمها "Keller" (١٩٦٨) على بلورة البولييمر والتي توضح قابلية البواير لتكوين بلورات ذات سلاسل مطوية folded - chain تعطى مفهومًا واضحًا للعلاقة بين التركيب الدقيق للبلمرات وخواصها الفيزيائية . ومن أمثلة الألياف العضوية ذات قوة التحمل العالية الـ high-performance organic fibres نجدها في ألياف الـ PPT .

ونذكر هنا الكلار والتايرين وهى أسماء تجارية لألياف الـ PPT . ولألياف الكلار ٤٩ خواص فيزيائية متميزة ، فمثلاً لها قوة شد عالية ومنحنى الإجهاد - الانفعال لهذه الألياف يمثل خط مستقيم ويوضح سلوكاً مرناً (elastic) عند تمديد extension صغير جداً . وحيث إن ألياف الكلار ٤٩ لها قوة شد نسبى - نسبة قوة الشد إلى وزنها النوعى - متميزة ، فإنها تستخدم كعوامل reinforcement للمواد المتراكبة composite materials .

ولقد استخدم "Carter and Schenk" (١٩٧٥) حيود الأشعة السينية والقياسات الضوئية - معامل الانكسار المزدوج - لربط الخواص الفيزيائية لهذا النوع من الألياف مع تركيبها ، وتوجد علاقة وثيقة بين معامل الإجهاد وترتيب الجزيئات حول المحور فى هذه الألياف . واستخدمت حيود الأشعة السينية عند قيم الزوايا الكبيرة (High-angle) لدراسة الترتيب المنتظم للنظام الشبكي lattice order .

وعين "Northolt" (١٩٧٤) أبعاد وحدة الخلية لألياف الـ PPT على أساس أنها أحادية الميل monoclinic وفيها :

$$a = 0.719 \text{ nm}, b = 0.518 \text{ nm}, c = 1.29 \text{ nm and } \gamma = 90^\circ$$

وقدم "Dobb and McIntyre" (١٩٨٤) دراسة تفصيلية عن تركيب الألياف الـ PTT وخصائصها الفيزيائية .

وتقدم قيم معاملات الانكسار n^{\parallel} و n^{\perp} طريقة مناسبة لمعرفة ترتيب الجزيئات في اتجاه محور الشعيرة وفي الاتجاه العمودى عليه ، بينما تقدم قيم معاملات الانكسار المزدوج طريقة لتقييم درجة انتظام وتقارب وتباعده الجزيئات في كل منطقة من مناطق الألياف متباينة الخواص الضوئية . وغالباً ما تضاف هذه القياسات الضوئية إلى نتائج طرق الفحص الأخرى باستخدام حيود الأشعة السينية والميكروسكوب الإلكتروني وطيف الأشعة تحت الحمراء لتعطى صورة متكاملة عن تركيب الألياف .

ولقد حسب "Hamza and Sikorski" (١٩٧٨) قيم معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف الـ PPT ، واستخدما ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا مع الضوء الأبيض والضوء أحادى طول الموجة المستقطب في الاتجاهين ، الموازى لمحور الشعيرة والعمودى عليه - انظر الفصلين الخامس والتاسع - وقيست معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف الكفلار ٤٩ باستخدام سائل معامل انكساره $n_L = 1.656$ وضوء أحادى طول الموجة ، وكانت النتائج كالآتى :

$$n^{\parallel} = 2.267, n^{\perp} = 1.605 \text{ and } \Delta n = 0.662$$

وذلك عند طول الموجة $\lambda = ٤٦٥$ نانومتر . ويلاحظ أن قيمة الانكسار المزدوج عالية جداً بالمقارنة بالألياف الأخرى التقليدية .

وناقش المؤلفان النتائج النظرية والتجريبية لمعاملات انكسار مادة الكفلار . ويعطى الجدول رقم (١/٣) قيم معاملات الانكسار n والانكسار المزدوج Δn لبعض الألياف الطبيعية والتركيبية .

جدول رقم (١/٣) : معاملات الانكسار n^{\perp} , n^{\parallel} والانكسار المزدوج Δn لبعض الألياف

الطبيعية والتركيبية :

Fibre	n^{\parallel}	n^{\perp}	Δn	Reference
Cotton	1.578	1.532	0.046	Preston (1933)
Ramie and flax	1.596	1.528	0.068	preston (1933)
Viscose rayon	1.539	1.519	0.020	Preston (1933)
Viscose rayon (skin)	1.5563	1.5282	0.0281	Faust (1952)
(core)	1.5536	1.5304	0.0234	Faust (1952)
Viscose rayon (skin)	1.5453	1.5226	0.0227	Barakat and Hindeleh (1964)
(core)	1.5441	1.5247	0.0194	
Wool	1.557	1.547	0.010	Hartshorne and Stuart (1970)
Polyethylene	1.574	1.522	0.052	Hartshorne and Stuart (1970)
Polypropylene	1.530	1.496	0.034	Hartshorne and Stuart (1970)
Acrlan	1.517	1.519	-0.002	Barakat and El-Hennawi (1971)
Acrlan	1.511	1.514	-0.003	Hartshorne and Stuart (1970)
Nylon 6	1.575	1.526	0.049	Hartshorne and Stuart (1970)
Nylon 6 (skin)	1.5533	1.5448	0.0085	Hamza <i>et al</i> (1985b)
(core)	1.5512	1.5430	0.0082	Hamza <i>et al</i> (1985b)
Nylon 66	1.578	1.522	0.056	Hartshorne and Stuart (1970)
Terylene	1.706	1.546	0.160	Hartshorne and Stuart (1970)
Dralon	1.5201	1.5234	-0.0033	Hamza <i>et al</i> (1985b)
Kevlar 49	2.267	1.605	0.662	Hamza and Sikorski (1978)

٣/٢- التركيب الطبقي للألياف التركيبية :

Layer structure in synthetic fibres

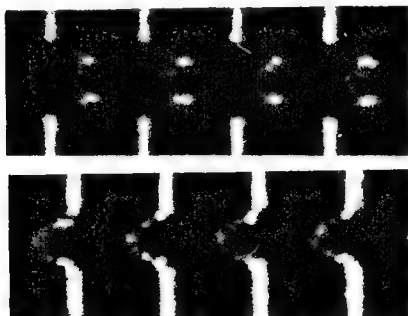
استخدم "Hamza and Kabcel" (١٩٨٦) هيب التداخل الضوئي المتعدد لقياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف البولي برويلين . وقيست إزاحات هذه الهيب في الطبقات المختلفة التي تكون الألياف غير المسحوبة undrawn ومن معامل الانكسار لكل طبقة . وبين الشكل (١/٣) صورة هيب التداخل الضوئي المتعدد لقياس عند النفاذ لألياف البولي برويلين ، واستخدم في هذه التجربة ضوء مستقطب أحادي طول الموجة ($\lambda = 468$ نانومتر) يتذبذب في مستوى (أ) مواز لمحور الشعيرة ، (ب) عمودي على محورها ، ولإجراء هذه التجربة استخدم مسطحان ضوئيان مفضضان ، يميل أحدهما على الآخر ويحصران بينهما سائلا (معامل انكسار مادته ١,٥٠١ عند درجة حرارة ٢٢,٥°م) غمرت فيه شعيرة . ولوحظ وجود ثلاث طبقات تكون الشعيرة ظهرت من تتبع هيب التداخل الضوئي عبر الشعيرة .

ونقتصر هنا على ذكر نتائج تعيين معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لكل من الثلاث طبقات فقط ، حيث إن تطبيق نظرية هيب التداخل الضوئي المتعدد لفيوز على الألياف متعددة الطبقات سوف ترد بالتفصيل في الفصل السادس . ويحتوى الجدول رقم (٢/٣) على قيم معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لكل طبقة من طبقات ألياف البولى بروبيلين باستخدام ضوء ذات طول موجه $\lambda = 461$ نانومتر عند درجة حرارة 22.5°C ، ومنه يتضح أن أنصاف أقطار الطبقات الثلاث هي :

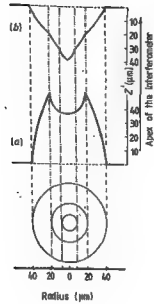
$$r_1 = 36.3 \mu\text{m}, \quad r_2 = 18.8 \mu\text{m} \quad \text{and} \quad r_3 = 9.6 \mu\text{m}.$$

حيث r_1 هي نصف القطر الخارجى للشعيرة .

وكما هو موضح فى الفصل السادس الأتى فإن كل طبقة تساهم فى إزاحة الهدبة التى مقدارها Z خلال المقطع العرضى للشعيرة والممتدة بمقدار X مقاسة من منتصف الشعيرة ، وتظهر على شكل نصف قطع ناقص على المستوى (X, Y) ، حيث تتكون هيب التداخل الضوئي . ويبين الشكل رقم (٢/٣) إزاحة الهدبة عند استخدام الضوء أحادى طول الموجه ، ويتذبذب فى كلا الاتجاهين الموازى والعمودى على محور الشعيرة على الترتيب .



شكل رقم (٢/٣) : هيب التداخل المتعدد عبر الألياف البولى بروبيلين . ويوضح وجود التركيب الطبقي للشعيرة على هيئة ثلاث طبقات باستخدام ضوء أحادى الطول الموجى ويتذبذب (أ) فى مستوى مواز لمحور الشعيرة ، (ب) فى مستوى عمودى على محورها (من Hamza and Kabeel, 1986)



شكل رقم (٢/٣) : منحني تقدير إزاحة الهدبة
مع البعد عن مركز الشعيرة باستخدام ضوء
يتخلل في مستوى (1) موازي لمحور الشعيرة (ب)
معدى عليه (من Hamza and Kabeel, 1986)

جدول رقم (٢/٣) : لقيم معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للطبقات المكونة لألياف
البولي بروبيلين عند استخدام ضوء أحادي طول الموجة عند ٤٦٠,١ نانومتر ودرجة حرارة
٢٢,٥ °م :

(Hamza and Kabeel 1986)

The mean refractive indices and mean birefringence of the fibre \pm	Refractive indices and birefringence of fibre layers \pm								
	First layer (outer layer)			Second layer			Third layer (core)		
Refractive index of liquid \pm , n_L	n_1^H	n_1^L	Δn_1	n_2^H	n_2^L	Δn_2	n_3^H	n_3^L	Δn_3
1.5015	1.5028	1.5001	0.0027	1.5032	1.5007	0.0025	1.5015	1.4995	0.0019

+ The error in measuring n_L using an Abbe refractometer is ± 0.0002 .

+ The error in n^H and n^L is ± 0.0007 .

٢/٣- تركيب الألياف البصرية : The structure of optical fibres

١/٢/٣- أنواع الألياف البصرية : Types of optical fibres

تتركب شعيرة الألياف البصرية في أبسط صورها من إسطوانتين من زجاج السيليكا مختلفتين في الإضاءة ومتحنتين في المحور كما هو موضح في الشكل رقم (٢/٣) ، وهو

عبارة عن شعيرة ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة step-index . ويعنى بذلك أن المنحنى الذى يمثل تغير معامل الانكسار عبر الشعيرة لها وقشرتها core and cladding ، يتميز بثبات قيمة معامل انكسار لب الشعيرة بالإضافة الى ثبات معامل انكسار قشرتها ، وإن معامل إنكسار مادة لب الشعيرة أكبر من معامل انكسار مادة قشرتها ، وتحتوى معظم الألياف البصرية على أكثر من طبقتين .

ويوضح الشكل رقم (٤/٣) شعيرة بصرية ذات لب متغير معامل الانكسار ، محاطة بقشرة معامل انكسارها ثابت القيمة ثم غطاء أو سترة Jacket بلاستيكية لحماية الشعيرة من الخدش ومسببات الإلتلاف الأخرى .

وتسمى الألياف المثلثة فى الشكل رقم (٤/٣) بالألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار (GRIN) graded index ، حيث يتناقص معامل انكسار لب الشعيرة على امتداد نصف القطر كلما بعد الموضع عن مركز الشعيرة ، وتكون أقصى قيمة لمعامل الانكسار عند محور الشعيرة .

ويوضح الشكل رقم (٥/٣) المقطع العرضى وبروفيل معامل الانكسار لبعض أنواع الألياف البصرية وكذلك أبعاد لب وقشرة الشعيرات .
وقميا إلى أنواع الألياف البصرية :

أ- ألياف ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، وهى عبارة عن إسطوانة من مادة عازلة وضعت فى الهواء ، رقم (أ) فى الشكل (٥/٣) .

ب- ألياف بصرية عديدة المنوال ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، « رقم (ب) فى الشكل (٥/٣) .

ج- ألياف بصرية وحيدة المنوال ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، « رقم (ج) فى الشكل (٥/٣) .

د- ألياف بصرية يأخذ فيها بروفيل معامل الانكسار الشكل W ، ويحاط لب الشعيرة بطبقتين ، الداخلية معامل انكسارها n_1 والخارجية معامل انكسارها n_2 ، حيث $n_1 < n_2$ « رقم (د) فى الشكل (٥/٣) .

هـ- ألياف بصرية متدرجة معامل الانكسار وعديدة المنوال ، وفيها معامل انكسار لب الشعيرة $n(r)$ يتغير بتغير البعد r عن مركز الشعيرة طبقاً للمعادلة :

$$n^2(r) = n^2(0) \left[1 - \Delta_1 \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]$$

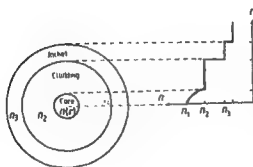
حيث

$$\Delta_1 = \frac{n^2(0) - n_1^2}{n^2(0)}$$

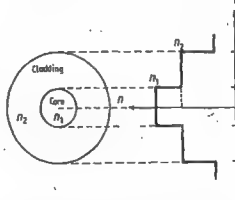
وتأخذ α القيم : $1.5 < \alpha < 2.5$

وتكون أعلى قيمة لمعامل الانكسار $n(r)$ عند محور الشعيرة ، وهذه الألياف ممثلة في رقم (هـ) في الشكل (٥/٣) .

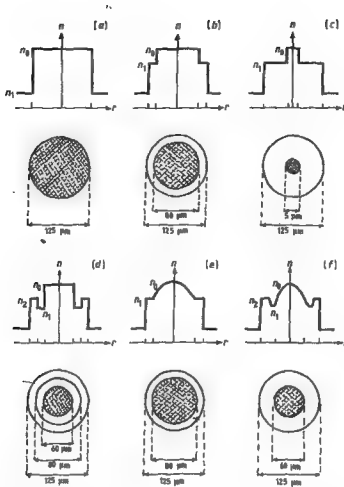
و- ألياف بصرية ذات لب متدرج معامل الانكسار ، ويأخذ فيها بروفايل معامل الانكسار الشكل W ، رقم (و) في الشكل (٥/٣) .



شكل رقم (٤/٣) : مقطع عرضي لشعيرة ذات بروفايل متدرج لمعامل انكسار لبها يوضح شكل تغيره وثبات معامل انكسار قشرتها .



شكل رقم (٣/٣) : مقطع عرضي لشعيرة ذات بروفايل معامل انكسار من درجة واحدة توضح ثبات معامل انكسار لب الشعيرة وقشرتها .



شكل رقم (٥/٤) : مقاطع عرضية وأبعاد وبيروانيات معامل الانكسار لأنواع مختلفة من الألياف البصرية
(From Costa, 1980).

وتحدد البارامترات الآتية خصائص الألياف البصرية ذات بروفيل معامل الانكسار من
درجة واحدة : step-index :

نصف قطر لب الشعيرة (a) ، الاتساع العددي (NA) numerical aperture الذي
يعرف بالمعادلة :

$$NA = (n_0^2 - n_1^2)^{\frac{1}{2}}$$

حيث n_0 معامل انكسار مادة لب الشعيرة ، n_1 معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة .

وترتبط قيمة الاتساع العددي بـ أقصى زاوية قبول maximum acceptance للأنشعة
الداخلية للشعيرة بالبارامتر V الذي تعطيه بالمعادلة :

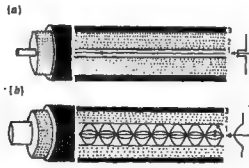
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \left(n_0^2 - n_1^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

حيث λ هي طول موجة الضوء .

وفى الواقع العملى تكون قيم Δ أقل بكثير من الواحد الصحيح وغالبا ماتساوى ٠.٢ أو أقل .

والألياف البصرية عديدة المنوال هي موجهاً للموجة التى تحتوى على عدة مناوليل للانتشار ، وتكون لهذه المناويل أو النهج مجالات لها توزيع دورى ، وعند تجمعها تحصل على توزيع أى مجال مسموح به داخل الشعيرة ، ويبين الشكل رقم (٦/٣) مسار الموجات الضوئية فى هذه المناويل .

وتوجد ثلاث مناطق تمثل اللب والقشرة والسترة البلاستيك على الترتيب ، ويوضح الشكل (١) شعيرة وحيدة المنوال بينما يوضح الشكل (ب) شعيرة متدرجة معامل الانكسار وعديدة المنوال .



شكل رقم (٦/٣) انتشار الموجات الضوئية فى (أ) شعيرة وحيدة المنوال ذات بروفيل معامل انكسار من درجة واحدة (ب) شعيرة متدرجة معامل الانكسار وعديدة المنوال .

٣/٢- الخصائص التركيبية للألياف البصرية :

Compositional characteristics of optical fibres

تكون الألياف البصرية المستخدمة فى التراسل الضوئى - غالبا - من نوعين أولهما وحيد المنوال والآخر متدرج معامل انكسار لهما ومتعددة المنوال . وفى النوع الأخير يتكون

لب الشعيرة من زجاج السيليكا المشاب ببعض العناصر فيتغير معامل انكسار أكسيد السيليكون ($n_0 = 1.450$ at $\lambda = 1.0 \mu m$) بإشباعته بمواد مثل أكاسيد الجرمانيوم والفوسفور واليورون - Rigtetink, 1975 .

فالإشابة بالجرمانيوم (MacChensey et al., 1974) أو الفوسفور - Payne and - Gambling 1974 - ترفع قيمة معامل انكسار أكسيد السيليكون ، أما الإشابة باليورون فتخفض هذه القيمة - French et al., 1973 .

وتوجه الألياف البصرية الموجات الضوئية إذا كانت مادة لبها ذات معامل انكسار أكبر من معامل انكسار مادة قشرتها - Marcuse, 1972 - لذلك فإن معظم الألياف البصرية تتكون من قشرة من أكسيد السيليكون النقي ولب ازداد معامل انكساره بإشباعته بأكسيد الجرمانيوم أو الفوسفور أو في بعض الألياف تشاب مادة القشرة بأكسيد اليورون لتقلل معامل انكسار مادتها بالنسبة لللبا غير المشاب .

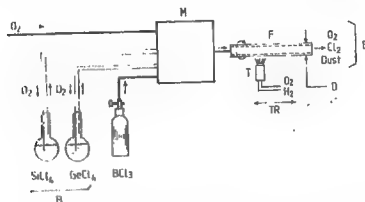
وتلعب مواد الإشابة دورا هاما ، حيث إنه بزيادة تركيز هذه المواد تزيد زاوية القبول acceptance angle للشعيرة وكذلك الاتساع العددي numerical aperture لها . ومن ناحية أخرى فإن زيادة مواد الإشابة تزيد من التغيرات في تركيب المادة وينتج عن ذلك فقد (في الضوء) عن طريق مسببات التشتت ، كما ينتج صعوبات تكنولوجية في عملية تكوين الشعيرة نتيجة اختلاف في الخواص الفيزيائية لب الشعيرة عن الخواص الفيزيائية للقشرة - Marcuse and Presby, 1980 - ويصل الفرق في معاملات الانكسار بين اللب والقشرة في الألياف المشابة بالجرمانيوم إلى ٠,٠٢ . وتقوم صناعة الألياف البصرية ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، وكذلك متدرجة معامل الانكسار على استخدام الطريقة الكيميائية المعدلة ، وذلك بترسيب الأبخرة MCVD - Mac Chensey et al., 1974

وفي عام (١٩٧٩) تم الحصول على ألياف يصل فيها الفقد إلى ٠,٢ ديسيبل لكل كيلومتر 0.2 dB km^{-1} عند الطول الموجي $\lambda = 1,٥٥$ ميكرومتر - Miya et al., 1979 - وتتضمن طريقة الـ MCVD عمليتين : أولاهما : إنتاج قوالب (preform) ذات تركيب معين ، ويتكون من لب وقشرة لها مواصفات الشعيرة وبأقطار تتراوح بين ٥,٥ و ٣ سم وطول بضعة سنتيمترات ، ثم إنتاج الشعيرات عن طريق سحبها من هذه القوالب باستخدام فرن

كهريائي ، ويكون قطر مقطع هذه القوالب هو حوالي ٧ ملليمتر أو يزيد ، بينما قطر الشعيرة يساوي ١٢٥ ± ١ ميكرومتر .

وحيث إننا بصدد دراسة الخواص التركيبية للألياف البصرية فمن المفيد إعطاء فكرة عن الطريقة الكيميائية المعدلة لتحضير هذه الألياف بترسيب الأبخرة MCVD - (شكل رقم ٧/٣) - وفي هذه الطريقة يتم تركيب أنبوية من الكوارتز على مخروطة glass-working lathe تدور ببطء ، بينما تنساب المواد المتفاعلة (كلوريد السيليكون $SiCl_4$ ومواد الإشابة $GeCl_4$, BCl_3) يحملها تيار من الأكسجين . ويستخدم لهب الأوكسي هيدروجين لترسيب وصهر طبقات المواد في نفس الوقت ، وذلك بتحريكه على امتداد الأنبوية الخارجية ، وتترسب حوالي خمسين طبقة بتكرار إمرار اللهب .

وتحضير ألياف بصرية ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة يثبت تركيز مادة الإشابة لكل الطبقات المرسبة ، بينما في حالة الألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار فيزداد تركيز مواد الإشابة مع زيادة عدد الطبقات ، وتؤدي إلى انخفاض قيمة معامل الانكسار مع زيادة البعد عن المحور . وفي نهاية العملية ترفع درجة حرارة اللهب فيحدث انصهار للأنبوية collapse ونحصل على القوالب النجامة . وتسحب الألياف من القوالب في المرحلة الأخيرة .



شكل رقم (٧/٣) : رسم تخطيطي يوضح عملية التحضير بالطريقة الكيميائية المعدلة بترسيب الأبخرة (MCVD) ، حيث F أنبوية من الكوارتز المنصهر ، D طبقة مرسبة من الزجاج ، M مقاييس توضع انسحاب الغازات flow meters ، B دوستان ، T موثد ، TR اتجاه حركة الموثد .

ولاختبار تركيب الطبقات المكونة للقالب استخدم "Marcuse and Presby" (١٩٨٠) الميكروسكوب الإلكتروني الماسح لفحص نهاية الشعيرة بعمل نحر (تاكل) etching لها ، وكانت نتيجة هذا الفحص احتفاظ الشعيرة بنفس التركيب الطبقي لها ، وأفاد المؤلفان بأن سمك كل طبقة في حالة الألياف التي فحصت أقل من طول الموجة ، وبالإضافة إلى أن قيمة معامل الانكسار غير ثابتة في كل طبقة من الطبقات .

وكذلك درست الخواص التركيبية للقوالب والألياف البصرية المحضرة بالطريقة الكيميائية الملعلة بترسيب الأبخرة Presby et al., 1975-MCVD - وذلك بطريقة التداخل الضوئي باستخدام شريحة على شكل قرص من الشعيرة interferometric slab method التي سيد شرحها في الباب الخامس - وباستخدام الميكروسكوب الإلكتروني الماسح .

وقد افاد المؤلفون أن التركيب الناتج من عملية الترسيب يوجد في جميع العمليات المتتابة ويظهر في الشعيرة بالإضافة إلى وجود انخفاض في معامل الانكسار عند مركز الشعيرة central dip ، ويرجع الاحتفاظ بنفس بروفيل معامل الانكسار في الشعيرة التي سحبت من القالب ببروفيل معامل الانكسار القوالب ، وذلك نتيجة أن معامل الانكسار يزداد تبعاً لدالة خطية مع تركيز مواد الإشابة في القالب وينفس الطريقة .

كما درست شريحة عرضية من القالب preform ذات سمك يساوي حوالي ١٠ ملليمتر باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي ، وحضرت عينات مماثلة من الشعيرات للفحص باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي والميكروسكوب الإلكتروني الماسح (Burrus and Standly, 1974) ، ونتج عن هذه الدراسة وجود التركيب الطبقي في القالب preform الذي أمكن الاستدلال عليه عند استخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي والإلكتروني الماسح .

وأظهرت هدب التداخل الثنائي لشريحة من قالب الشعيرة Presby et al., 1975 - preform هدب التداخل الضوئي على هيئة خطوط مستقيمة ومتوازية في قشرة الشعيرة التي هي من مادة السيليكا النقية المصهورة ، مما يؤكد تجانس مادتها ، يلي ذلك طبقة من البروسيليكات معامل انكسار مادتها أقل من معامل انكسار مادة القشرة . وتمنع هذه الطبقة وصول أية مواد غريبة إلى لب الشعيرة وانتشارها . ويتم ترسيب مادة لب الشعيرة

زيادة معدل سريان كلوريد الجرمانيوم $GeCl_4$ الذى ينتج عنه ازدياد محتوى اكسيد الجرمانيوم GeO_2 ، ومن ثم زيادة فى معامل الانكسار طوريا مع زيادة سمك المادة المشابة .

ولقد قام presby ومجموعته بزيادة عدد مرات ترسيب كلوريد الجرمانيوم $GeCl_4$ إلى ١١ مرة ينتج عنها بروفيل معامل انكسار لب الشعيرة يتبع مسار قطع مكافئ اعتبارا من القشرة حتى مركز الشعيرة . وأوضحت خريطة صور التداخل الضوئى التركيب الطبقي داخل لب الشعيرة الناتج من كل رحلة ترسيب . وكانت نتيجة قياس الفرق فى معامل انكسار مادة القشرة وأعلى قيمة لمعامل انكسار لب الشعيرة عند محورها يعطى قيمة Δn تساوى ٠.٠١٦ . كما أفاد المؤلف أن قدرة ميكروسكوب التداخل الضوئى على فصل المعالم الدقيقة لم تكن كافية لتحديد طبقات لب الشعيرة كلا على حدة . ولقد استخدم المؤلف ميكروسكوب الكبريتى ماسح لتحديد هذه الطبقات .

جنير بالذكر أن بركات ومجموعته - Barakat et al., 1988 - باستخدام هذب التداخل الضوئى المتعدد أمكن أن يعدلوا طبقات لب الشعيرة مندرجة معامل الانكسار ويعينوا سمك كل طبقة ومعامل انكسار مادتها . مما يوضح قدرة هذب التداخل الضوئى المتعدد على تحديد المعالم التركيبية الدقيقة بالمقارنة بهذب التداخل الضوئى الثنائى - ويبين الشكل (٨/٣) صورة هذب التداخل الضوئى موضحا بها التركيب الطبقي لب الشعيرة - ووجد أن الشعيرة تتركب من طبقات متعاقبة لها معاملات انكسار متزايدة بشكل تدريجى ، حيث $n(r)$ تظل قيمتها ثابتة لسمك الطبقة Δr ، ولكنها تتبع العلاقة المعروفة التى تربط $n(r)$ مع المسافة من مركز لب الشعيرة r

$$n(r) = n_0 \left[1 - 2 \Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} \quad 0 \leq r \leq a \quad (3.1)$$

حيث a نصف قطر لب الشعيرة .

وكذلك فإن Δ تعطىها المعادلة :

$$\Delta = (n^2(o) - n^2(a)) / 2 n^2(o)$$

و α هو بارامتر يحدد شكل بروفيل معامل الانكسار .

وقد تم دراسة هذا البروفيل في الألياف متدرجة معامل الانكسار GRIN نظريا وأكدت النتائج تجريبيا من صور التداخل الضوئي . وقسم نصف قطر لب الشعيرة إلى طبقات أو مناطق عددها m وعرض كل منها Δr وتمثل r_m نصف قطر الطبقة m

$$0 = r_0 < r_1 < r_2 \dots < r_{m-1} < r_m = a$$

$$(r_m - r_{m-1}) = \frac{a}{m} = \Delta r = \text{constant.}$$

ويطبق معامل الانكسار العلاقة :

$$n(r) = n_{TO} > n_{r1} > \dots > n_{rm} = n_a = n_{clad}$$

وكذلك فإن :

$$n(r) = f(r)$$

هي المعادلة الأساسية لللب الشعيرة في الألياف الـ GRIN .

ويمكن استنتاج قيم r_m لجميع قيم m من المعادلة (٣-١) وقيمة إزاحة الهبة الناتجة من عدة طبقات m المكونة لللب الشعيرة ، بالإضافة إلى قشرة الشعيرة يعطى بالتجميع summation ، وتشارك كل طبقة بنصف قطع ناقص الطول النصفى لمحوريه الأساسيين semi-principal axis هما :

$$\left\{ r_f, \frac{4 \Delta Z}{\lambda} (n_{clad} - n_f) r_f \right\}, \left\{ a, \frac{4 \Delta Z}{\lambda} (n_{r_{m-1}} - n_{clad}) a \right\}, \\ \left\{ r_{m-1}, \frac{4 \Delta Z}{\lambda} (n_{r_{m-2}} - n_{r_{m-1}}) r_{m-1} \right\}, \dots$$

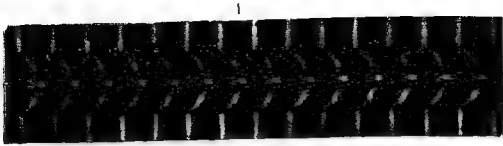
كما هو موضح في الفصل السادس .

والشكل (١/٨/٣) يبين صورة التداخل الضوئي المتعدد لشعيرة من الألياف الـ GRIN سمكها $t_f = 125 \pm 1 \mu m$. وتظهر الهبة على شكل خطوط مستقيمة ومتوازية وهي توازي حافة الإسفين الضوئي wedge المكون من مسطحين ضوئيين مقبضين يميل

أحدهما على الآخر ، ويحصران بينهما سائلا غمرت فيه الشعيرة ، وكانت المسافة بين كل هديتين متتاليتين هي ΔZ . وعندما تعبر الهبة السطح الفاصل بين السائل وقشرة الشعيرة تتبع مسارا على شكل جزء من قطع ناقص (ماعدا حالة تساوى معامل انكسار السائل مع معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة $n_L = n_{clad}$ حيث تستمر الهبة فى نفس الاتجاه) . وعندما تعبر الهبة منطقة لب الشعيرة فإنها تظهر مراحل متقطعة discontinuities ومتناوبة ، وينتج ذلك عن التغير المفاجئ فى بروفيل معامل الانكسار للطبقات المتناوبة المحتوية على نسب معينة من مواد الإشابة ، ويلاحظ أن هذا التقطع فى الهدف يوجد فقط فى منطقة لب الشعيرة وجميع رتب التداخل الضوئى التى تظهر خلال هذا اللب وعلى طول الشعيرة . ويظهر هذا التأثير باستخدام سوائل لها معاملات انكسار n_L مختلفة (شكل ٨/٣ ب) ، وتسمح هبة التداخل الضوئى فى المستوى X, Z - حيث تتكون الهدف - بحساب كل من $\Delta n, \alpha$ بطريقة الـ Barakat et al., (1985) invariance - ويوضح الشكل (٩/٣) بروفيل معامل الانكسار متعدد الدرجات ، ويحدد امتداد كل طبقة من صورة التداخل الضوئى فى المستوى (X, Z) بإسقاط جزء الهبة على المحور X ، ووجد أن :

$$r_m - r_{m-1} = \Delta r = 0.1a = 2.5 \mu m$$

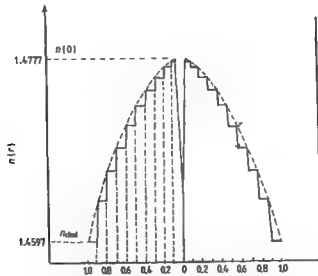
ونصف قطر لب الشعيرة (a) يساوى ٢٥ ميكرومتر $m = 10$ ، $(n_{r_m} - n_{r_{m-1}})$ ، تقل نحو المركز فى درجات كل منها يساوى ٠.٠٠٠٢٠ . . .



ب



شكل رقم (٨/٢) : خريطة هيب التداخل الضوئي للمتعدد وفيه تم فصل وتحديد الطبقات المكونة للاب الشعيرة للشعيرات متدرجة معامل انكسار لديها وكان سمك الشعيرة I_F مساويا ١٢٥ ميكرون ، ونصف قطر لها ٢٥ ميكرون ، ومعامل انكسار قشرتها ١,٤٥٩٧ عند طول موجي ٥٤٦١ أنجستروم ، معامل انكسار سائل الفعر $n_F = ١,٤٦٢٣$ ، الصورة (١) ، ١,٤٥٨٨ ، الصورة (ب) .



شكل رقم (٩/٢) : يوضح بروفييل لب الشعيرة متدرجة معامل الانكسار ويظهر فيها الشكل الهرمي المتدرج وكذلك انخفاض معامل الانكسار عند مركز الشعيرة ، $\Delta n = ٠,١٨$.

References

- Barakat N and El-Hennawi H A 1971 *Textile Res. J.* **41** 391
- Barakat N, El Hennawi H A and El-Diasti F 1988 *Appl. Opt.* **27** 5090
- Barakat N, Hamza A A and Goneid A S 1985 *Appl. Opt.* **24** 4383
- Barakat N and Hindeleh A M 1964 *Textile Res. J.* **34** 581
- Bunn C W 1949 The optical properties of fibres in "Fibre Science" ed. J M Preston (Manchester : The Textile Institute) pp 144-57
- 1961 *Chemical Crystallography - An Introduction to Optical and X-Ray Methods* (Oxford : Oxford University Press) pp 304-22
- Bunn C W and Daubeny P 1954 *Trans. Faraday Soc.* **50** 1173
- Burrus C A , Chinnock E L, Gloge D, Holden W S, Tingue Li, Standley R D and Keck D B 1973 *Proc. IEEE* **61** 1498
- Burrus C A and Standley R D 1974 *Appl. Opt.* **13** 2365
- Carter G B and Schenk V T J 1975 Ultra-high modulus organic fibres in "Structure and Properties of Oriented Polymers" ed. I M Ward Ch. 13 (London : Applied Science) pp 454-92
- Costa B 1980 The optical fibre in "Optical Fibre Communication", Technical Staff of CSELT (New York : McGraw-Hill) pp 1-46
- Denbigh K G 1940 *Trans. Faraday Soc.* **36** 936
- Dobb M G and McIntyre J E 1984 *Adv. Polym. Sci.* **60/61** 61
- Faust R C 1952 *Proc. Phys. Soc.* **B65** 48
- Françon M 1961 *Progress in Microscopy* (Oxford : Pergamon)
- French W G, Pearson A D, Tasker G W and MacChesney J B 1973 *Appl. Phys. Lett.* **23** 338
- Hamza A A and Kabeel M A 1986 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **19** 1175
- Hamza A A and Sikorski J 1978 *J. Microsc.* **113** 15
- Hamza A A, Sokkar T Z N and Kabeel M A 1985 a *J. Phys. D: Appl. Phys.* **18** 1773
- 1985b *J. Phys. D: Appl. Phys* **18** 2321
- Hartshorne N H and Stuart A 1970 *Crystals and the Polarizing Microscope* (London : Edward Arnold) pp 556-88
- Keller A 1968 *Rep. Prog. Phys.* **31** 623
- Kita H, Kitano I, Uchida T and Furukawa M 1971 *J. Am. Ceramic Soc.* **54** 321

- Kuhn W and Grün F 1942 Kolloidzchr. **101** 248
- MacChesney J B O, Connor P B and Presby H M 1974 Proc. IEEE **62** 1280
- Marcuse D 1972 Light Transmission Optics (New York : Van Nostrand Reinhold)
- Marcuse D and Presby H M 1980 Proc. IEEE **68** 668
- Meredith R and Hearle J W S 1959 Physical Methods of Investigating Textiles (New York : Interscience).
- Miya T, Terunuma Y, Hosaka T and Miyashita T 1979 Electron. Lett. **15** 106
- Northolt M G 1974 Europ. Polym. J. **10** 799
- Payne D N and Gambling W A 1974 Electron. Lett. **10** 289
- Presby H M, Standley R D, MacChesney J B and O'Connor P B 1975 Bell Syst. Tech. J. **54** 1681
- Preston J M 1933 Trans. Faraday Soc. **29** 65
- Rigterink M D 1975 Tech. Dig. Topical Meet. Optical Fibre Transmission Jan. 7-9, Williamsburg, VA
- Stoves J L 1957 Fibre Microscopy (London : National Trade Press)
- Wells O C 1974 Scanning Electron Microscopy (New York : McGraw-Hill).

الفصل الرابع

أساسيات التداخل الضوئي

Principles of Interferometry

١/٤ - مقدمة :

سوف نتناول هنا حالة التغير في السعة وفي الطور للموجات عند نقطتين P_1, P_2 في مجال موجي wavefield نتجت عن مصدر ضوئي ممتد ينبعث عنه أطوال موجية ليست متساوية تماما وإنما تتمركز حول طول موجي واحد extended quasi-monochromatic source ، ونفترض أن هذا المجال الموجي موجود في الفراغ ، وأن P_1, P_2 تبعدان عن بعضهما بمسافة تساوي هذه أطوال موجية ، فإذا كانت النقطتان P_1, P_2 قريبتين من بعضهما فإن التغيرات في سعة الموجات عند هذه النقط وكذلك التغيرات في الطور ترتبط كل منها بالآخرى ، ومن المنطقي أن نفترض أن النقطتين P_1, P_2 قريبتان من بعضهما إلى الحد الذي يكون فيه الفرق في المسار (PD) من النقطة S حيث $PD = SP_1 - SP_2$ يكون صغيرا بالمقارنة بالطول الموجي المتوسط $\bar{\lambda}$ ، وتكون التغيرات عند P_1, P_2 متساوية عمليا . وكذلك يوجد علاقة بين هذه التغيرات حتى في الحالة التي تكون النقطتان P_1, P_2 منفصلتين بمسافة أكبر ، بشرط أن يكون فرق المسار PD لجميع النقط الموجودة على المصدر الضوئي لايزيد عن طول الترابط l_c Coherent length .

$$l_c = C \Delta t = \frac{C}{\Delta \nu}$$

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta \lambda}{\bar{\lambda}} \quad \text{لكن:}$$

$$\Delta \nu = \frac{\Delta \lambda}{\bar{\lambda}} \nu = \frac{\Delta \lambda}{\bar{\lambda}} \cdot \frac{C}{\bar{\lambda}} = \frac{\Delta \lambda}{\bar{\lambda}^2} \cdot C$$

$$l_c = \frac{(\bar{\lambda})^2}{\Delta \lambda}$$

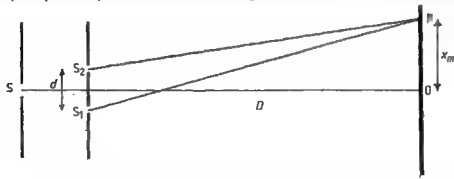
حيث Δt زمن الترابط ، $\Delta \nu$ اتساع خط الطيف بوحدة التردد .

وبذلك نصل إلى مفهوم منطقة الترابط region of coherence حول أى نقطة P فى المجال الموجى .

وحتى نستطيع أن نجد وصفا مناسبيا لمجال موجى نتج عن مصدر ضوئى محدود ينبعث منه أطوال موجية متعددة ، فإنه من المرغوب فيه إدخال مقياس للارتباط المتبادل الذى يوجد بين الذبذبات عند النقط المختلفة P_1, P_2 فى المجال . ولابد أن نتوقع أن هذا المقياس يرتبط ارتباطا وثيقا بحدّة هيب التداخل الضوئى التى تحدث عند التقاء الذبذبات الناتجة من نقطتين . وأن نتوقع كذلك تكون هيب تداخل ضوئى حادة عندما يكون الارتباط المتبادل بينهما كبيرا . مثال ذلك : عندما يخرج الضوء عند P_1, P_2 من مصدر ضوئى صغير جدا له مدى طيفى محدود ، ويتوقع عدم تكون هيب تداخل ضوئى فى غياب هذا الارتباط المتبادل بين النقطتين ، ومثال ذلك : عندما تستقبل P_1, P_2 ضوء من مصدرين مختلفين .

٢/٤- تقسيم جبهة الموجة : Division of wavefront

توجد عدة طرق لتقسيم جبهة الموجة إلى جزئين وإعادة اتحادهما عند زاوية صغيرة . ومن أمثلة ذلك : تكوين هيب التداخل الضوئى فى تجربة الشق المزدوج لـ Young's experiment ومراة قرنل Fresnel mirror ومنشور قرنل الثنائى Fresnel biprism . وفى جميع هذه الحالات يتبع الشعاعان المنبعثان من نفس المصدر مسارين مختلفين ، يختلف طول أحدهما عن الآخر ، ويسمح لهما بالالتقاء مرة أخرى (شكل رقم ١/٤) .



شكل رقم (١/٤) : تجربة الشق المزدوج لـ Young . S مصدر ضوئى وحيد الطول الموجى .

ونحصل على فرق الطور δ بين شعاعين من المعادلة :

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ (Path difference)}$$

ويكون فرق المسار مساويا $m \lambda$ عند $(\delta = 2m\pi)$ حيث m تساوى صفرا ، ١ ، ٢ ، ٣ ،

وتتكون هدب تداخل ضوئى مضبوطة ، وتظهر على الحائل (شكل رقم ١/٤) على مسافة X_m من النقطة O إذ :

$$X_m = m \lambda D/d$$

حيث d هي المسافة بين الفتحتين S_1, S_2 ، D هي المسافة بين الحائل وهاتين الفتحتين.

وفى كل مقاييس التداخل الضوئى المذكورة سابقا يتبع توزيع الشدة الضوئية قانون مربع جيب التمام cosine square law ، وتكون الهدب على مسافات متساوية من بعضها وهى هدب لا يقتصر تكونها على مستوى واحد فى الفراغ أى تتكون فى أى مستوى أمام الفتحتين وينص قانون مربع جيب التمام على الآتى :

$$I = 4 I_0 \cos^2 \delta/2$$

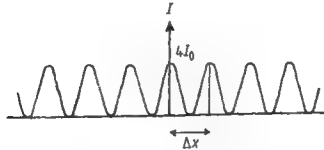
حيث I_0 هي شدة كل من الموجتين . ويوضح الشكل رقم (٢/٤) توزيع الشدة الضوئية الناتجة من التداخل الضوئى الثانى .

وتتكون هدب التداخل الضوئى المعتمدة عند :

$$X = (m + \frac{1}{2}) \lambda D/d$$

والمسافة بين كل هدبتين مضببتين أو معتمتين متتاليتين (Δx) كما هو موضح فى الشكل

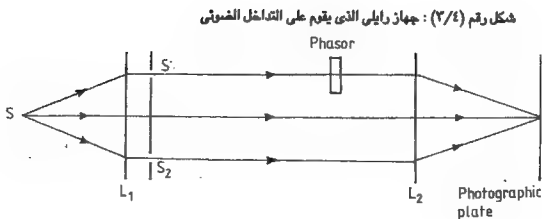
رقم (٢/٤) .

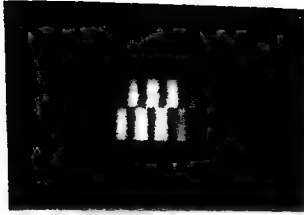


شكل رقم (٢/٤) : توزيع الشدة الضوئية فى حالة هدب التداخل الضوئى الثانى .

وتنقص درجة تباين هذب التداخل الضوئى visibility of fringes بزيادة فرق المسار الضوئى ، حيث إن المصدر لا يمكن أن يكون أحادى طول الموجة تماما . وتختلف درجة التباين visibility عند رتب التداخل الضوئى التالية بعيدا عند النقطة O (شكل رقم ١/٤) عندما يزيد فرق المسار الضوئى عن طول الترابط coherent length لهذا المصدر الضوئى .

ويوجد مثال آخر لهذب التداخل الضوئى الناتجة من تقسيم جبهة الموجة وذلك فى جهاز رالى Rayleigh's refractometer حيث ينقسم الضوء الصادر من مصدر ضوئى خطى linear source وتتكون حزمة متوازية من الأشعة بواسطة العدسة L_1 وتنقسم جبهة الموجة عند مرورها بفتحتين S_1, S_2 بينهما مسافة ، ويتبع الشعاعان مسارين متساويين تماما ، ولكن أحد هذين الشعاعين يمر فى وسط phasor وينتج عن ذلك حدوث فرق فى الطور بين الشعاعين ، وتتكون هذب تداخل ضوئى على شكل خطوط مستقيمة فى المستوى البؤرى للعدسة L_2 كما هو موضح فى الشكل رقم (٣/٤) . ولتحديد مركز هذا النظام يستخدم مصدر ضوئى أبيض white light source للحصول على الهدبة الصفيرة zero order fringe وتظهر المجموعتان وتسجلان ، وفى نفس الوقت يغطى كل منهما نصف مجال الرؤية ، كما هو موضح فى الشكل رقم (٤/٤) .





شكل رقم (٤/٤) : هدبة التداخل ذات الرتبة الصفرية (لتفسير تكوينها يرجع إلى الأساس النظرى)

٣/٤ تقسيم السعة : Division of amplitude :

لطريقة التداخل الضوئى بتقسيم السعة نفس الأهمية التى لطريقة تقسيم جبهة الموجة وذلك فى التطبيقات العملية . وعندما يسقط شعاع من الضوء على شريحة رقيقة معامل انكسار مادتها n وسطها متوازيان وموضوعة فى الهواء ، فإن جزءا من سعة الموجة الساقطة ينعكس عند السطح الأول أى هواء / شريحة ، وينفذ الجزء الباقى خلال الشريحة بعد انكساره ليقابل السطح الآخر للشريحة ، كما هو موضح فى الشكل رقم (٤-٥) . وعند النقطة B يحدث انعكاس عند السطح الفاصل شريحة / هواء ، وينفذ جزء من الضوء على امتداد الشعاع BE . ويمر جزء آخر خلال الشريحة ليصل إلى السطح العلوى حيث يحدث انعكاس عند السطح الفاصل شريحة / هواء ، وينفذ جزء عند النقطة C . ويترك الشعاعان السطح العلوى عند النقطتين A , C متوازيين ، وعند تجميعهما عند المستوى البؤرى للعدسة تنتج هدب تداخل ضوئى بالانعكاس حيث إنهما مترابطان . وكذلك فإن الشعاعين اللذين يتركبان السطح السفلى عند النقطتين B , D يمكن تجميعهما عند المستوى البؤرى للعدسة لتكوين هدب تداخل ضوئى ثنائى عند النفاذ ، حيث إنهما أيضا مترابطان .

افرض أننا حسبنا فرق المسار الضوئى بين الشعاعين النافذين المتجمعين فى المستوى البؤرى للعدسة . فعندما يصل الشعاع المنكسر إلى النقطة B ينقسم إلى جزئين ، أحدهما يمر فى الاتجاه \vec{BE} والآخر يأخذ المسار \vec{BCD} ، وحيث إن الموجة تصل إلى النقطة D فإن الشعاع الآخر \vec{BE} يصل إلى النقطة D' حيث :

$$BD' = nBC + n CD$$

وهذان الشعاعان كانا في البداية متحدين في الطور وينبعان من النقطة B . وباستخدام عدسة يمكن تجميع هذين الشعاعين بطور كل منهما في المستوى البؤري لهذه العدسة . وبالتالي فإننا نعلم بفرق الطور عند النقطتين E, D , وحيث إن الموجتين عند D', D لهما نفس الطور ، فإن فرق الطور بين الموجتين عند النقطتين E, D تعطيه المعادلة الآتية ، كما يتضح من الشكل رقم (٥/٤) :

$$\frac{2\pi}{\lambda} ED' = \frac{2\pi}{\lambda} (nBC + nCD - BE) = \frac{2\pi}{\lambda} 2nt \cos r$$

وفي حالة هدبة مضئية في نظام التداخل الضوئي عند النفاذ يكون :

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2nt \cos r = 2 m\pi$$

$$m\lambda = 2nt \cos r$$

حيث m هي رتبة التداخل الضوئي .

وحيث إنه في نظام التداخل الضوئي عند الانعكاس يحدث تغير في الطور مقداره (π) درجة عند الانعكاس من السطح الفاصل هواء / شريحة ، فإن الشعاع المنعكس عند A يعاني تغيراً في الطور مقداره π بالنسبة للشعاع النافذ إلى B والمنعكس عندها شريحة / هواء (film / air) .

ويكون شرط تكون هدبة مضئية عند الانعكاس هو :

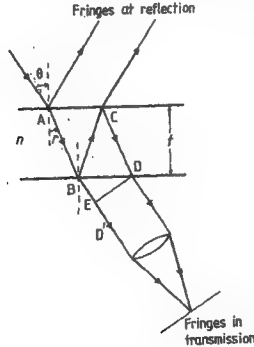
$$\left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda = 2nt \cos r.$$

ويكون التغير في الطور عند الانعكاس عند السطح الفاصل شريحة / هواء مساوياً للصفر . وبإضاءة هذه الشريحة بضوء أحادي طول الموجة تتكون هدب تداخل ضوئي ذات رتب متتالية عندما يكون سمك الشريحة ثابتاً ولكن بتغير زاوية السقوط θ . وهذه الهدب متساوية في قيم الزاوية θ أي هدب متساوية الميل fringes of equal inclination . وهي محددة الموقع وتتكون في مستوى في مالاتهاية ، ويمكن تجميعها في المستوى البؤري لعدسة

، كما هو موضح في الشكل رقم (٥/٤) . وعندما تكون θ ثابتة فلا بد من تغير قيمة t للحصول على هدب تداخل ضوئي متتالية الرتبة . ويسمى هذه الهدب بهدب تساوي السمك fringes of equal thickness ، وهي محددة الموقع في الفراغ بالقرب من مقياس التداخل ، وفي حالة إسفين ضوئي هوائي air wedge مضاء بحزمة متوازية من الأشعة أحادية طول الموجة ويزاوية سقوط مقدارها θ تتكون هدب تداخل ضوئي على هيئة خطوط مستقيمة توازي حافة الإسفين الضوئي . وفي حالة السقوط العمودي تتكون الهدب في مستوى محدد الموقع وقريب جدا من الإسفين الضوئي .

وبصورة عامة تكون الهدب متساوية (nt) إذا كانت n تعتمد على الموقع وهي الهدب متساوية السمك البصري fringes of equal optical thickness .

ويوجد مثال آخر على هدب التداخل الضوئي الناتجة من تقسيم السعة وذلك في مقياس التداخل الضوئي ليكسون Michelson interferometer . وفيه يتداخل شعاعان نتجا من تقسيم السعة بعد أن ينعكسا على مرآتين مستويتين ليأخذا في النهاية نفس المسار ليلتقيا وتتكون هدب التداخل الضوئي .



شكل رقم (٥/٤) : هدب التداخل المتكونة عند النفاذ وعند الانعكاس الناتجة من تقسيم السعة .

٤/٤- تداخل الضوء المستقطب فى مستوى : Interference of plane polarised light

اكتشف " Fresnel and Arago " - انظر 1973, Tolansky - بالتجربة القواعد المطلوبة لحزمتين ضوئيتين مستقطبتين لكي تعطى هدب تداخل وهذه القواعد هي :

أ- لا يمكن أن نحصل على هدب تداخل ضوئى من شعاعين من الضوء مستقطبتين فى مستويين متعامدين على بعضهما .

ب- يمكن أن نحصل على هدب تداخل ضوئى من شعاعين من الضوء مستقطبتين فى مستويين متوازيين .

ج- تتداخل حزمتان ضوئيتان مستقطبتان فى نفس المستوى إذا انبعثتا من نفس المصدر ، أى أنهما مترابطتان coherent .

سنتناول هنا حالات مبسطة لها علاقة بهذا الموضوع . والحالة الأولى هي حالة شريحة ذات مسطحين متوازيين من (١) مادة أحادية المحور uniaxial material و (٢) مادة ثنائية المحور biaxial material والحالة الثانية هي حالة الألياف الطبيعية والتركيبية التى لها انكسار مزدوج birefringence .

وينتج من القاعدة (ب) أن الأشعة المتعددة المستقطبة وذات الانعكاسات فى نفس المستوى يمكن أن تتداخل لتعطى هدب تداخل ضوئى متعدد .

٤/٤-١ حالة بلورة أحادية المحور قطعت عمودية على المحور البصرى :

The case of a uniaxial crystal cut perpendicular to the optic axis :

إذا سقط شعاع على بلورة أحادية المحور ، فإنه يخرج منها منفصلا إلى شعاعين مستقطبين متعامدين - ماعدا حالة الشعاع الذى يمر على امتداد محور البلورة - :

أولا : الشعاع المعتاد أو المألوف ordinary ray ، وفيه تتذبذب مركبة المتجه الكهربى elec- tric vector عموديا على مستوى السقوط plane of incidence ، ويكون معامل انكساره n_o ثابتا ولا يعتمد على اتجاه الانتشار .

ثانيا : الشعاع الشاذ أو غير المألوف extra ordinary ray ، وفيه تتذبذب مركبة المتجه الكهربى فى مستوى سقوط الضوء ، ويتغير معامل الانكسار n_e' مع زاوية السقوط ، ويحتفظ معامل الانكسار بقيمة محددة n_e للضوء الساقط عموديا على المحور البصرى التى تعطىها المعادلة الآتية لاية زاوية انكسار r_e

$$\frac{1}{n_e'^2} = \frac{\cos^2 r_e}{n_0^2} + \frac{\sin^2 r_e}{n_e^2}.$$

وتعطى الأشعة المنعكسة المتعددة والناجمة من كل من الشعاعين المنكسرين مجموعة هذب تداخل ضوئى ، وإذا كانت δ_1, δ_2 هما فرق المسار فى الحالتين فإن :

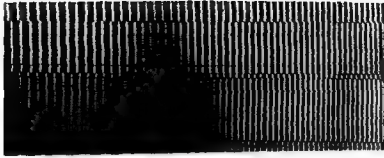
$$\delta_1 = 2n_0 t \cos r_0$$

$$\delta_2 = 2n_e' t \cos r_e$$

وذلك بإهمال الانحراف فى المعادلة الأساسية .

وعند مركز كل من النظامين أى أنه فى حالة $\Theta = 0$ صفر ، $(n_e' = n_0)$ لا يحدث انفصال بين المكونين اللذين لهما نفس رتبة التداخل والذين يتتبعان لكل من النظامين . وبزيادة الزاوية Θ نجد أن قيمة n_e' تعتمد بانتظام عن n_0 ، ويحدث الانفصال عند قيمة مضيئة لزاوية مقدارها Θ .

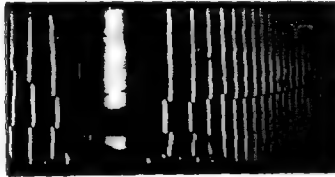
وتتكون هذب التداخل الضوئى بسهولة باستخدام شريحة رقيقة تم انفلاقها حديثا من نوع جيد من فووجويات الميكا ، وتفضض الميكا بتغطية كل من سطحها بطبقة رقيقة من الفضة انعكاسيتها R تساوى ٨٠٪ وذلك بالتخير الحرارى . ويتم الحصول على هذب تساوى الرتبة اللونية - انظر Tolansky, 1948 - الموضحة بالشكل رقم (١/٤) ، باستخدام مطياف الانحراف الثابت . ونلاحظ عدم وجود ازواجية لهذب التداخل التى تنتج عن الانكسار المزدوج ، يؤكد ذلك أن عينة ميكا الفووجويات يمكن أن تعتبر بلورة أحادية المحور uniaxial crystal.



شكل رقم (٧/٤) هدب تساوى الرتبة اللونية الناتجة من شريحة من بلورة أحادية المحور

هدب تداخل تساوى المماس :

يتم تشكيل العينة بثنيها لى تصبح على شكل نصف إسطوانة ، ويسقط عليها حزمة متوازية من الضوء أحادى طول الموجة ، وتتكون هدب على شكل خطوط مستقيمة توازي محور هذه الإسطوانة على لوح حساس موضوع عموديا على محور الإسطوانة مارا بالمركز 0 . ونلاحظ هنا أن زوايا سقوط الأشعة المتوازية تتغير من صفر درجة عند المركز إلى زاوية تقارب ٩٠° ، وهذه هي هدب تساوى ميل المماس fringes of equal tangential inclination. Tolansky and Barakat, 1950 ، والشكل رقم (٧/٤) يوضح الهدب الناتجة .



شكل رقم (٧/٤) : هدب تساوى ميل المماس الناتجة من شريحة بلورة أحادية المحور

ويوضع منشور نيكول Nicol prism فى مسار الشعاع الساقط يمكن إثبات أن مجموعتين من الهدب تتذبذبان فى مستويين متعامدين ، وتتكون المجموعة الخارجية بالشعاع

الذي يتذبذب متجهة الكهرى عموديا على مستوى السقوط أى الشعاع المعتاد ، وذلك لأن ميكافراوجويايت عبارة عن بلورة سالبة negative crystal أى أن :

$$(Barakat, 1958) \quad n_o > n_e$$

٢/٤- حالة بلورة ثنائية المحور قطعت عمودية على اتجاه منصف الزاوية الحادة بين المحورين

The case of a biaxial crystal cut perpendicular to the acute bisectrix :

حيث إن أى شعاع يسقط على بلورة يفصل عادة إلى شعاعين مستقطبين فى مستويين متعامدين وينتشران بسرعتين مختلفتين قليلا عن بعضهما وفى اتجاهين مختلفين أيضا ، فإن الأشعة المتعددة والمتكونة نتيجة انعكاس كل من الشعاعين تكون مجموعتين من هذب التداخل الضوئى. ويفرض ان δ_1, δ_2 هما فرق المسار الضوئى فى حالة النظامين ينتج أن :

$$\delta_1 = 2n^{\perp} t \cos r'$$

$$\delta_2 = 2n^{\parallel} t \cos r''$$

حيث :

$$\sin \Theta = n^{\perp} \sin r' = n^{\parallel} \sin r''$$

n^{\perp}, n^{\parallel} هما معامل الانكسار فى حالة الشعاعين وعند زاوية سقوط معينة Θ .

افرض أننا أخذنا فى الاعتبار المستوى المحتوى على المحور البصرى ، فإن قطاع سطح الموجة بهذا المستوى يتكون من دائرة نصف قطرها n_m وقطع ناقص محورها n_p و n_g ، ولقطاع الدائرى :

$$\delta_1 = 2n_m t \cos r$$

وكذلك :

$$\delta_1^2 = 4t^2 \left(n_m^2 - \sin^2 \Theta \right) \quad (4.1)$$

ولقطاع على هيئة قطع ناقص :

$$\frac{1}{n^2} = \frac{\cos^2 r}{n_g^2} + \frac{\sin^2 r}{n_p^2}$$

وذلك فإن :

$$n^2 = n_g^2 - \sin^2 \Theta \left(\frac{n_g^2}{n_p^2} - 1 \right) \quad (4.2)$$

وكذلك

$$\delta_2^2 = 4t^2 \left(n_g^2 - \frac{n_g^2}{n_p^2} \sin^2 \Theta \right) \quad (4.3)$$

وبذلك تتكون مجموعتان من هذب التداخل الضوئى لايعتمد إحداهما على الأخرى ، مستططين فى اتجاهين متعامدين . تتبع المجموعة الأولى المعادلة رقم (١/٤) وهى ذات معامل انكسار n_m ثابت القيمة ، وتتذبذب عموديا فى مستوى السقوط . وتتبع المجموعة الثانية المعادلتين رقم (٢/٤) ، (٣/٤) ، بمعامل انكسار n متغير مع زاوية Θ كما هو فى المعادلة رقم (٢/٤) ومعامل الانكسار n يساوى n_g عندما تكون $\Theta = 0$ صفر حيث :

$$n_g > n_m > n_p$$

وبزيادة Θ تقل قيمة n وتأخذ القيمة

عند زاوية سقوط تساوى القيمة الظاهرية لزاوية المحور الضوئى E التى تحقق المعادلة الآتية :

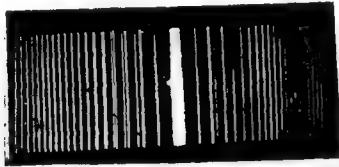
$$\sin E = n_p \left(\frac{n_g^2 - n_m^2}{n_g^2 - n_p^2} \right)^{1/2}$$

وتستمر قيمتها فى النقصان حتى تصل فى النهاية إلى القيمة n_p عند $(\Theta = \pi/2)$

يعنى ذلك أنه بدءا بزوايا سقوط صغيرة ، تكون الهذبة الخارجية هى التى تتذبذب فى مستوى السقوط ، ويقط الفرق بكل زوج من الهذب ينتمى لمجموعتى الهذب وله نفس رتبة التداخل ، يقل مع الزاوية Θ إلى أن يحدث تطابق عند $E = \Theta$ ، وبزيادة زاوية السقوط Θ عن E يبدأ الفرق فى الزيادة لكنه تكون الهذبة الداخلية هى التى تتذبذب فى مستوى السقوط .

وعلى الجانب العلوى تختار عينة جيدة من مسكوفيت ميكا moscovite mica ، ويمعن المستوى الذى يحتوى على المحور البصرى باستخدام ميكروسكوب مستقطب polarising microscope ، وتلق شريحة رقيقة من هذه الميكا وتفضض من الوجهين ، وتشكل بعد ذلك على هيئة إسطوانة فى اتجاه تقاطع المستوى الذى يحوى المحور الضوئى للبلورة مع سطح الانفلاق لها .

ويبين الشكل رقم (٨-٤) هذب تساوى ميل المماس equal tangential inclination ، ويكون النظامان مستقطبين فى مستويين متعامدين . وقبل حدوث التطابق بين الهذب تكون الهلبة الخارجية هى التى تنتمى إلى الشعاع الذى يتذبذب فى مستوى السقوط ، فى حين أنه بعد حدوث الانطباق تنتمى الهذب الداخلية إلى مثل هذا الشعاع الذى يتذبذب فى مستوى السقوط .



شكل رقم (٨/٤) : هذب تساوى ميل المماس المتكونة عند استخدام شريحة من البلورة ثنائية

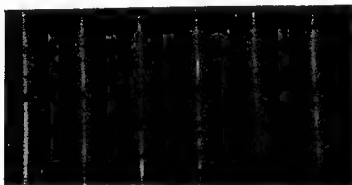
٢/٤/٤- حالة الألياف التركيبية ذات الانكسار المزدوج :

The case of synthetic fibre exhibiting birefringence :

عند غمر شعيرة من ألياف الاكريلان Acrilan fibres فى إسفين ضوئى مفضض Silvered wedge ، يحوى سائلا تم إضاءته باستخدام ضوء أحادى طول الموجة ، يسقط عموديا على مقياس التداخل الضوئى - فإنه تتكون هذب تداخل ضوئى عند النفاذ وعند الانعكاس .

ويبين الشكل رقم (٤-٩) هيب فيزو للتداخل الضوئي عند استخدام ضوء غير مستقطب وتظهر اثنان للهدبة الواحدة ، وذلك ناتج عن الانكسار المزدوج لألياف الاكريلان Barakat and El-Hennawi, 1971- .

ونذكر هنا هذا المثال فقط لتوضيح تداخل الموجات المستقطبة ، حيث إن الفصل السادس يتناول بالتفصيل طريقة تطبيق هيب التداخل الضوئي لتعيين معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف .



شكل رقم (٩/٤) هيب التداخل المتعدد عند النفاذ عبر شعيرة من ألياف الاكريلان

٥/٤- الهولوجرافيا والتداخل الضوئي الهولوجرافى :

Holography and holographic interferometry :

٥/٤-١ الهولوجرافيا : Holography

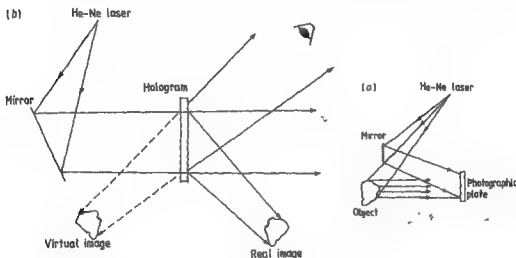
وضع « جابور Gabor » سنة ١٩٤٨ أسس الهولوجرافيا التى تسجل المعلومات الكاملة عن الموجة ، سعتها وطورها ، من المعروف أنه تسجل المعلومات عن سعة الموجة على الأفلام الحساسة كشدة ضوئية بينما تسجل معلومات طور الموجة عن طريق التراكب مع موجة مرجع مترابطة معها . وقد تم الحصول على الهولوجرام - الصور ذات الثلاثة أبعاد أو الصور المجسمة - عمليا عام (١٩٦٢) بعد اكتشاف أشعة الليزر . والهولوجرام هو نموذج للتداخل الضوئى يتكون من التقاء موجة حاملة للمعلومات عن الجسم مع موجة مرجع . ويبين

الشكل رقم (١٠/٤) النظام البصري لتكوين الهولوجرام . إذ تلتقي الموجات ذات السعة المركبة التي تترك الجسم $A_0 = a_0 \exp(iQ_0)$ مع الشعاع المرجع $A_r = a_r \exp(iQ_r)$ عند اللوح الحساس ، وتعطى المعادلة الآتية توزيع الشدة الضوئية $I(x,y)$ الناتجة :

$$I(x,y) = |A_0 + A_r|^2 = (A_0 + A_r)(A_0^* + A_r^*) \\ = a_0^2 + a_r^2 + A_0 A_r^* + A_r A_0^*$$

٢/٥/٤- التداخل الضوئي الهولوجرافي : Holographic interferometry

تنقسم تطبيقات الهولوجرافيا إلى قسمين أساسيين : أولهما يحتاج إلى تكوين الصور في ثلاثة أبعاد للرؤية بالعين ، والأخرى تستخدم فيها الهولوجرافيا كأداة للقياس .



شكل رقم (١٠/٤) : رسم توضيحي لتسجيل الهولوجرام (a) وإعادة تكوين جبهة الموجة (b)

وعندما ترى العين صورة جسم في الثلاثة أبعاد نجد الهولوجرام يسجل التفاصيل الدقيقة عن الجسم مثل الشقوق والعواف وخشونة السطوح ذات بعد حوالي ١ ميكرومتر - انظر 1978 Denisyuk .

ويعتبر التداخل الضوئي الهولوجرافي - holographic interferometry - واحد من أهم تطبيقات الهولوجرافيا التي تستخدم كأداة

للقياس ، ويقدم الشكل رقم (١١/٤) الفكرة العامة عن هذه الطريقة ، ويستخدم فيها نفس اللوح الحساس H لتسجيل هولوجرامين للجسم أحدهما في وضعه الأول O_1 والثاني في وضعه الأخير O_2 ، ومثال ذلك نجده في جسم تم تشويبه تحت تأثير إجهاد p .



شكل رقم (١١/٤) : يوضح تسجيل الهولوجرام بطريقة التعريض الثنائي

وفي طريقة التصوير ثنائي التعريض double-exposure technique يتكون هولوجرام للجسم قبل تشويبه ، وبعد التشويه يعرض الهولوجرام مرة أخرى للضوء الذي يصل إليه من الجسم في وضعه الجديد ، وتكون النتيجة وجود موجات متراكبة وتكون هدب تداخل ضوئي تعمل معلومات عن الازاحات التي نتجت عن تشويه الجسم . أي التغير في طول المسار الضوئي والتغير في معاملات الانكسار - مثل الذي يحدث في النفق الهوائي والعمليات المشابهة - يعطى نماذج تداخل ضوئي مماثلة . ويمكن إجراء قياس التغير في المسافات بهذه الطريقة بدقة تصل إلى $\frac{1}{1000}$ من الميكرومتر أو أقل .

ويجد التداخل الضوئي الهولوجرافي تطبيقات في مجال الايرو ديناميكي aerodynamics حيث يستخدم في دراسة سريان الموائع حول الأجسام المختلفة .

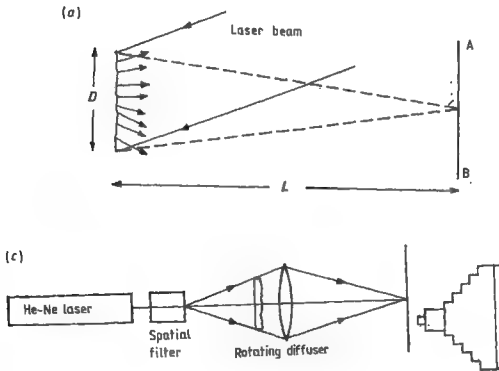
٦/٤- البقع والضوئية والتداخل الناتج عنها : Speckle and speckle interferometry

عندما يضاء سطح خشن بضوء مترابط ، فإن حزمة الأشعة المتعكسة تكون نموذجاً عشوائياً random pattern من نقاط مضيئة ونقاط مظلمة تسمى بالبقع والضوئية (Françon, 1979) ، ويمكن تفسير هذه النماذج باستخدام مبدأ Huygen's principle الذي ينص على أن شدة الضوء عند أي نقطة في المجال

المضاء تكون نتيجة تداخل الموجات التي تنشئت من النقط المختلفة في المنطقة المضاءة من السطح ، ويختلف طول هذه الموجات باختلاف الارتفاعات على السطح الخشن . ويعتمد النموذج الفراغي spatial pattern ودرجة تباين البقعة الضوئية على النظام البصري المستخدم لرؤيتها ، ودرجة ترابط الضوء المستخدم في الإضاءة ودرجة خشونة السطح المضاء .

ويمكن ملاحظة البقع الضوئية عندما يتفذ شعاع ضوئي مترابط أحادي طول الموجة خلال جسم نصف شفاف ذي سطح خشن ، ويوضح الشكل رقم (١٧/٤) نظاما بصريا مبسطا لتسجيل البقع الضوئية عند الانعكاس . وتوجد هذه البقع في كل الفراغ أمام الجسم الخشن والحائل AB . وتعطى المعادلة الآتية متوسط القطر $\langle \delta \rangle$ للبقعة الضوئية الناتجة من سقوط حزمة من الأشعة الضوئية ذات طول موجي λ على مساحة مستديرة قطرها D :

$$\langle \delta \rangle = 1.2 L/D$$



شكل رقم (١٧/٤) النظام البصري المستخدم لتسجيل البقع الضوئية (لزيد من التفاصيل يرجع الى الملتن) .

حيث L هي المسافة بين السطح المضاء والحائل أو الفيلم الحساس .

وتعتبر العناصر المسئولة عن تشتت الضوء التي تساهم في التداخل الضوئي المكون للبقيعات الضوئية عاملا هاما يحدد خصائص هذه البقيعات .

ولتصوير البقيعات الضوئية يضاء جسم له سطح خشن يحزمة من الأشعة الضوئية من مصدر مترابط مرتين ينتج عن ذلك نموذج للبقيعات المتكونة في الصورة الأولى مزاحة عدة ميكرومترات قليلة عن الصورة الثابتة ، ويتوفر دائما علاقة ترابط بين النموذجين . وتسمى هذه الطريقة بالتصوير ثنائى التعريض للبقيعات الضوئية ، *Doube-exposure speckle photography* ، وتستخدم بكثرة طرق تصوير البقيعات الضوئية والتداخل الضوئي الناتج عنها لقياس سرعات الموائع - Barker and Fourny, 1977, Iwata et al. 1978 , Simpkins and Dudderer 1978, Barakat et al. 1987 .

وتستخدم أيضا في قياس الإزاحات والإجهادات - Barker and Fourny, 1976 - وقد طبق "Barakat et al" (١٩٨٦) طريقة التصوير ثنائية التعريض للبقيعات الضوئية لقياس سرعة دوران سطح خشن على هيئة قرص من زجاج مصنفر . وفي هذه الطريقة يوجه شعاع ليزر نبضى ($\lambda = 6940$ أنجستروم) من خلال فتحة خيقة ثم يتم زيادة مساحة مقطع حزمة الأشعة لتضئ مساحة ذات قطر ٢٠ ملليمتر على قرص الزجاج المصنفر الذى يدور حول مركزه . وتسقط نبضتان من أشعة الليزر على لوح حساس حبيباته بقيقة ذات قوة تحليل عالية ، والزمن بين كل نبضتين متتاليتين يساوى ٨٠٠ ميكروثانية . وبعد تظهير الفيلم الحساس يوضع فى نظام ترشيح وتظهر مجموعة من هدب يونج *Young's fringes* ، وتعطى المعادلة الآتية العلاقة بين المسافة S التى تفصل أى هذين متجاورتين والإزاحة :

$$X = D / S$$

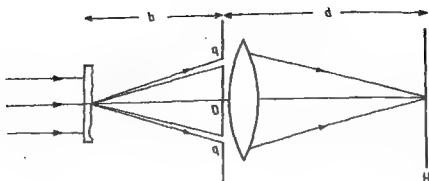
حيث D هي المسافة بين الفيلم الحساس والمستوى الذى يتم فيه الرؤية .

$2/\lambda$ - تداخل البقيعات الضوئية : *Speckle interferometry*

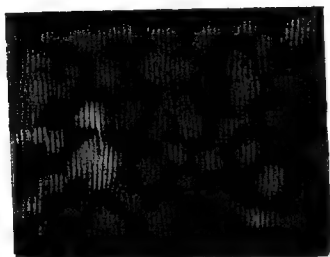
تم فى التجربة التى قام بها جونز ويكس (Jones and Wykes 1983) فى تداخل البقيعات الضوئية ، الحصول على هدب تداخل تنجت عن مجموعتان من البقيعات تربطهما

علاقة ترابط ، تتج ذلك إما عن إزاحة بين المناطق المترابطة من نمونجى البقيعات أو وجود تغير فى الطور بينهما . ويبين الشكل رقم (١٢/٤) النظام البصرى المستخدم فى تداخل البقيعات الضوئية ، وفيه يسمح لحزمة الأشعة المنبعثة من ليزر هيليوم - نيون بأن تسقط على سطح خشن من الزجاج المصنفر عن طريق تقبين دائريين قطر كل منهما ٢م تفصلهما مسافة قدرها ٢٠م ، وتستخدم عدسة لتكوين صورة البقيعات الناتجة من الجسم ، بحيث تكون قوة التكبير مساوية للواحد الصحيح ، وينتج عن ذلك تركيب شبكى داخل البقيعات وقد وجد أن البعد بين أى هديتين متجاورتين لهذا التركيب تساوى ٩٠٥ ميكرون . يتم تسجيل صورتين البقيعة المتكونة ومعها تركيبها الشبكي مع إزاحة الجسم إزاحة تساوى ضعف البعد بين أية هديتين متجاورتين تسخان فى التكوين الشبكي grid spacing أى المسافة البينية لكل هديتين متجاورتين . أعقب ذلك تسجيل البقيعات بعد إزاحة الجسم مضاعفات للمسافة البينية للشبكة أى ٢٨ و ٥٧ و ٧٦ ميكرون ، وكان اتجاه الإزاحة موازيا للخط المستقيم الذى يصل بين الفتحتين ، وبعد تظهير اللوح الحساس الذى تم تعريضه مرتين يأخذ مكانه فى نظام الترشيح - كما هو موضح فى الشكل رقم (١٣/٤) ويبين الشكل رقم (١٤/٤) التركيب الشبكي الذى تم تكوينه ويهدف قياس الإزاحة ومن ثم السرعات .

من الأهمية بمكان أن نذكر المدى الذى تقع فيه الإزاحات التى يمكن قياسها بطريقة التعريض الثنائى باستخدام البقيعات الضوئية وباستخدام تداخل البقيعات الضوئية وعند استخدام الطريقة الأولى تكون أقل إزاحة مقاسة مساوية لأقل قطر δ الهدبة المتكونة من سطح خشن مستخدم كمشتت . ومن مواصفات النظام البصرى المستخدم نجد أن قيمة قطر البقيعة يساوى ١٠ ميكرون تقريبا . ولكى يمكن تسجيل مثل هذه البقيعات منفصلة عن بعضها عمليا يتبغى استخدام مستحلب له قوة تحليل عالية ، حيث يكون قطر حبيباته أقل من قطر البقيعة .



شكل رقم (١٣/٤) : النظام البصري المستخدم في عملية الترشيع



شكل رقم (١٤/٤) : التركيب الشبكي المتكون باستخدام طريقة تداخل البقع

في حالة ما تكون إزاحة الجسم أقل من قطر البقعة ينبغي استخدام طريقة التداخل بين البقع القائمة على التعريض الثنائي . وفي هذه الحالة تكون أقل إزاحة مقاسة مساوية للمسافة البينية للشبكة المتكونة داخل البقعة ، هذه المسافة تساوي $\lambda P/D$ ، حيث D هي البعد بين الثقبتين المتعاكسين ، P بعد الجسم عن مستوى الثقبتين .

References

- Barakat N 1958 *J. Opt. Soc. Am.* **48** 92
- Barakat N, El-Ghandoor H, Merzkirch W and Wernekink U 1988 *Exp. Fluids* **J.6** 71
- Barakat N and El-Hennawi H A 1971 *Textile Res. J.* **41** 391 .
- Barakat N, Hamed A H and El-Ghandoor H 1987 *Optik* **76** 78
- Barakat N, Merzkirch W and El-Ghandoor H 1986 *Optik* **74** 114
- Barker D B and Fourney M E 1976 *Exp. Mech.* **18** 209
- 1977 *Opt. Lett.* **1** 136
- Denisjuk Yu N 1978 *Fundamentals of Holography* (Moscow: Mir) pp 116-18
- Françon M 1979 *Laser Speckle and Applications in Optics* (New York : Academic)
- Gabor D 1948 *Nature* **161** 777
- Iwata K, Hakoshima T and Nagata R 1978 *Opt. Commun.* **25**
- Jones R and Wykes C 1983 *Holographic and Speckle Interferometry* (Cambridge: Cambridge University Press)
- Ostrovsky Yu I, Butusov M M and Ostrovskaya G V 1980 *Interferometry by Holography* (Springer Series in Optical Sciences) (Berlin : Springer) pp 73-5
- Simpkins P G and Dudderer T D 1978 *J. Fluid Mech.* **89** 665
- Tolansky S 1948 *Multiple-Beam Interferometry of Surfaces and Thin Films* (Oxford: Clarendon) p 126
- 1955 *An Introduction to Interferometry* (London : Longmans, Green)
- Tolansky S and Barakat N 1950 *Proc. Phys. Soc.* **63** 345
- Vest C M 1979 *Holographic Interferometry* (New York : Wiley)

الفصل الخامس

تطبيقات التداخل الضوئي الثنائي على الألياف

Two-beam Interferometry Applied to Fibrous Materials

١/٥- مقدمة :

وضح في أثناء دراسة تركيب الألياف في الفصل الثالث أن معظم الألياف الطبيعية والتركيبية لها خاصية التباين الضوئي optical anisotropy ، وأن معاملات انكسار هذه الألياف للضوء المستقطب في اتجاه محور الشعيرة (n^{\parallel}) وفي الاتجاه العمودي عليه (n^{\perp}) والانكسار المزوج (Δn) ، حيث $\Delta n = n^{\parallel} - n^{\perp}$ ، تمثل بارامترات تحدد الخواص الضوئية والتركيبية لهذه الألياف على المستوى الجزيئي . وتقدم هذه البارامترات معلومات مفيدة للباحثين ومنتجي ومستخدمي الألياف ، حيث تلعب دورا هاما في معرفة طريقة تنظيم الجزيئات في هذه الألياف . ويمكن تعيين هذه الخواص الضوئية باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي الثنائي Two-beam interference microscope ، وتقدم هذه الطريقة معلومات كمية عن الخواص الضوئية لقشرة لب الشعيرات غير المتجانسة heterogeneous fibres ، وكذلك يقدم ميكروسكوب التداخل الضوئي الثنائي معلومات عن تغير معاملات انكسار الألياف بتغير :

أ- طول موجة الضوء المستخدم .

ب- درجة الحرارة .

ج- قوة الشد الواقع على الشعيرة .

ويهدف هذا الفصل إلى شرح نظرية وتطبيق ميكروسكوبات التداخل الضوئي الثنائي لدراسة الألياف في الحالات الآتية :

١- ألياف ذات مقاطع عرضية منتظمة وغير منتظمة :

أ- الألياف المتجانسة .

ب- الألياف غير المتجانسة والتي يحتوى تركيبها على قشرة لب ج- الألياف متعددة الطبقات multilayer fibres .

٢- الألياف البصرية بنوعيه GRIN, STEP .

وسنتناول في الفصل السابع استخدام طرق التداخل الضوئي في تعيين تضاريس سطح الألياف ودرجة الملاسة وعدم الانتظام في نصف قطر الشعيرة على امتداد محورها . وتنقسم الأجسام بالنسبة للميكروسكوب الضوئي إلى أجسام تغير من سعة الموجة $amplitude\ objects$ وأجسام تغير من طور الموجة $phase\ objects$. وفي الحالة الأولى تختلف الأجسام في درجة امتصاصها للضوء بالنسبة للوسط المحيط بها ، وبذلك توجد نسبة معينة من التباين بين الجسم والوسط المحيط به . أما الأجسام التي تغير طور موجة الضوء فلا تؤثر في الضوء الممتص لكنها تختلف عن الوسط المحيط بها نتيجة سمكها الضوئي $optical\ thickness\ (nt)$ حيث n معامل انكسار المادة ، t قيمة سمكها . وتقوم ميكروسكوبات التداخل الضوئي في استخداماتها على فكرة الأجسام التي تغير طور الموجة $phase\ objects$.

وقد ابتكرت عدة ميكروسكوبات ضوئية كل منها يحتوى على مقياس تداخل ضوئي ثانى مثل مقياس ماخ وزندر Mach - Zehnder ونومارسكى Nomarski وميكروسكوب التداخل الضوئي المستقطب لبلوتا Pluta Polarising Interference Microscope والانتراكفى Interphako وميكروسكوب بيكر Baker ودايسون Dyson ولينز Leitz وزايس - لينيك Zeiss-Linnik .

ويحتوى الفصل التاسع على شرح تفصيلي للنظام البصري ومسار الضوء وتكون صور التداخل الضوئي الثنائي للأجسام باستخدام أنواع من هذه الميكروسكوبات . أما في هذا الفصل فسندرس نظرية وتطبيق هذه الميكروسكوبات لتعيين خواص الألياف مع التركيز على معاملات الانكسار للألياف ذات المقاطع العرضية المنتظمة وغير المنتظمة والمتجانسة التركيب وغير المتجانسة وكذلك استنباط بروفيل معامل الانكسار للألياف البصرية بنوعيه GRIN, STEP وال GRIN .

١/١- الدراسات السابقة لتطوير وتطبيق طريقة التداخل الضوئي الثاني على الألياف النسيجية

Previous investigations and reviews of the literature on the development of interference microscopy and its application to textile fibre materials :

قدم « بلوتا Pluta » عام (١٩٨٢) في كتابة باللغة البولندية عرضاً عن تطوير ميكروسكوبات التداخل الضوئي ابتداء من تصميم جامن - ليبيدف Jamin-Lebedev وسمث Smith ، وبلوتا Pluta ، والميكروسكوبات التي تتبع نظام « ماخ وزندر-Mach-Zehender » - يرجع إلى عرض وتلخيص لهذا الكتاب باللغة الإنجليزية قسمة « سيكورسكى Sikorski » عام (١٩٨٤) - كما شمل هذا الكتاب دراسة تفصيلية عن ميكروسكوبات التداخل الضوئي الثاني متضمنة الميكروسكوبات التي تعمل بالضوء المنعكس ، وذكر المؤلف الأسباب التي دعت إلى تصميم ميكروسكوب بلوتا - Pluta, 1971, 1972 .

وقد استخدم Faust (١٩٥٦) ميكروسكوب سميث - بيكر Smith - Baker لتعيين التغير في معاملات الانكسار لعينات غير متجانسة ضوئياً . وتم الحصول على مجموعة هذب عيارية في الخلفية بإسحال شريحة من الكوارتز بين الشعيرة والمحلل analyser .

وطور "McKee and Woods" (١٩٦٧) هذه الطريقة حيث تم الاستغناء عن شريحة الكوارتز .

واستخدم "McLean" (١٩٧١) ميكروسكوب ليتز Leitz للتداخل الضوئي الثاني لتحليل التغيرات الشاذة في معامل الانكسار المزوج لألياف البولي استر . وقيس معامل الانكسار المزوج لألياف الاكرليك acrylic fibres المشدودة في جو من البخار وذلك عند نسب سحب مختلفة باستخدام ميكروسكوب زايس Zeiss Ultraphot للتداخل الضوئي Blakey et al., 1970 - 1970 ، والميكروسكوب التداخل الضوئي لبلوتا Pluta, 1965, 1971, 1972 - القدرة على توفير مجال رؤيا متجانس أو هذب تداخل ضوئي مع انقسام عرضي للصورة Lateral image duplication ، وباستخدام هذا الميكروسكوب يمكن استنباط معلومات كمية عن معاملات الانكسار والانكسار المزوج لقشرة وباب شعيرات الألياف المختلفة .

واستخدم بلوتا - "Pluta" (١٩٧٢) هذا الميكروسكوب لدراسة بعض الألياف التركيبية . كما استخدم "Hamza and Sikorski" (١٩٧٨) هذا النوع من الميكروسكوبات لتعيين

الخواص الضوئية لألياف الكفلاز (PPT) ، وقاما بحساب استقطابية هذه الألياف باستخدام النموذج الجزيئي molecular model الذى قدمه "Northolt" (١٩٧٤) مع قيم استقطابية الروابط الكيميائية التى قدمها "Denbigh" (١٩٤٠) وكذلك "Bunn and Daubeny" (١٩٥٤) ، وباستخدام صيغة لورنتز - لورنز Lorentz-Lorenz حسب قيم معاملات الانكسار الأساسية لهذه الألياف ذات الانكسار المزدوج العالى .

وهين "Simms" (١٩٥٨) الانكسار المزدوج للجسام غير المنتظمة المقاطع العرضية .
واستخدم "Hamza" (١٩٨٠) ميكروسكوب بلوتا لقياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف غير المنتظمة المقاطع العرضية .

وهين "Zurek and Zakrzewski" (١٩٨٣) معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف القطن باستخدام ميكروسكوب بلوتا باتباع الطريقة التى قدمها "Hamza" (١٩٨٠) وقد أجرى هذان الباحثان هذه القياسات بوضع شعيرات القطن فى محلول له قوة تفرق عالية وتمت القياسات لطولين موجيين من الضوء ، ونتاج صورتان للشعيرة كانت إحدهما نتيجة معامل الانكسار فى اتجاه محور الشعيرة (n^{\parallel}) والأخرى نتيجة معامل الانكسار فى الاتجاه العمودى عليه (n^{\perp}) . وهذه الطريقة هى نتيجة تزاوج طريقة "Simms" (١٩٥٨) وطريقة بلوتا "Pluta" (١٩٦٥) The dual-wavelength method .

كما عالج "Dorau and Pluta" (١٩٨١) صعوبة القياس الدقيق للمسار الضوئى فى مجال التداخل الضوئى عند قياس إزاحات الهدب ، فعند استخدام ميكروسكوب بلوتا مع مستقطبات متعامدة يمكن الاستعانة بالضوء الأبيض للتصرف على الهدبة الصفرية Zero-order fringe واستخدام Hamza and co-workers ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا لدراسة ألياف البولى استرو والكفلاز وسليسلووز الرايون التشابرى cuprammonium وألياف المركبات المزدوجة من مادتين bicomponent ذات المقاطع العرضية المنتظمة وغير المنتظمة لتحسين معاملات انكسارها والانكسار المزدوج Hamza (1986), Hamza and Abd El-Kader (1986), Hamza and El-Farahaty (1986), Hamza and El-Dessouki (1987) and Hamza et al., (1986) .

وقد لخص « حمزة Hamza » عام (١٩٨٦) الأبحاث التي استخدم فيها ميكروسكوب التداخل الضوئي الثنائي لدراسة الألياف النسيجية مع توضيح الطريقة المستخدمة ونوع الألياف ونتائج هذه الأبحاث .

٢/٥- نظرية ميكروسكوب التداخل الضوئي لبلوتا : Pluta microscope

يمثل هذا الجهاز ميكروسكوب تداخل ضوئي يمكن بواسطته الحصول على مجال رؤيا متجانس uniform أو هيب تداخل ضوئي تعبر صورتين منفصلتين للجسم تحت الفحص .

وقد طبق "Hamza" (١٩٨٠) هذا الميكروسكوب لقياس معاملات الانكسار والانكسار المزوج للألياف ذات المقاطع العرضية العرضية غير المنتظمة ، ويتضمن قياس معامل الانكسار المتوسط للشعيرة ، وقد أجريت هذه القياسات بالاستخدام التكاملي لكل من ميكروسكوب التداخل الضوئي لبلوتا والميكروسكوب الإلكتروني الماسح الذي تم بواسطته تعيين مساحة مقطع الشعيرات .

تعطى المعادلتان التاليتان فرق طول المسار الضوئي $\Delta \Gamma_{\parallel}$, $\Delta \Gamma_{\perp}$ بين العينة وسائل الفهر ، باعتبار أن معامل انكسار السائل هو n_L ، ومعامل انكسار الشعيرة المتوسط للضوء المستقطب استوائيا في اتجاه محور الشعيرة وفي الاتجاه العمودي عليه هما n_a^{\parallel} , n_a^{\perp} على الترتيب :

$$\Delta \Gamma_{\parallel} = (n_a^{\parallel} - n_L) t \quad (5.1)$$

$$\Delta \Gamma_{\perp} = (n_a^{\perp} - n_L) t \quad (5.2)$$

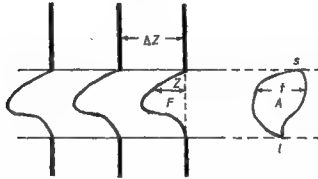
وتقاس قيم $\Delta \Gamma_{\parallel}$, $\Delta \Gamma_{\perp}$ بوحدات قياس الطول (المليمتر مثلا) ويقاس سمك الشعيرة (t) بنفس الوحدة .

وتعطى المعادلة (٣-٥) معامل الانكسار المزوج المتوسط Δn_a :

$$\begin{aligned} \Delta n_a &= n_a^{\parallel} - n_a^{\perp} \\ &= (\Gamma_{\parallel} - \Gamma_{\perp}) / t. \end{aligned} \quad (5.3)$$

وبين الشكل (١/٥) هدف التداخل الضوئي الثنائي عندما تعبر شعيرة ذات مقطع عرضي غير منتظم مساحته A - أو إحدى الصورتين الناتجتين من ميكروسكوب التداخل الضوئي الثنائي بالانكسار المزوج - ويعطى فرق طول المسار الضوئي $\Delta \Gamma$ بالمعادلة :

$$\Delta \Gamma = \frac{Z}{\Delta Z} \lambda \quad (5.4)$$



شكل رقم (١/٥) : هدف التداخل غير منتظمة المقطع العرضي ومساحته A .

حيث Z هي مقدار إزاحة الهدف عندما تعبر الشعيرة في اتجاه عمودي على محورها ΔZ هي المسافة بين هئتين متتاليتين في منطقة السائل ، λ هي طول موجة الضوء المستخدم .

وعلى ذلك يمكن كتابة المعادلات الآتية :

$$\frac{Z^{\parallel}}{\Delta Z} = (n_a^{\parallel} - n_L) \frac{t}{\lambda} \quad (5.5)$$

$$\frac{Z^{\perp}}{\Delta Z} = (n_a^{\perp} - n_L) \frac{t}{\lambda} \quad (5.6)$$

$$Z^{\parallel} = t \frac{\Delta Z}{\lambda} (n_a^{\parallel} - n_L) \quad (5.7)$$

وبإجراء التكامل للمعادلة (٥-٧) في المنطقة $s \geq d$ تنتج المساحة F المحصورة تحت إزاحة الهدف عندما تعبر الشعيرة :

$$\int_s^1 Z^{\parallel} dx = \frac{\Delta Z}{\lambda} (n_a^{\parallel} - n_L) \int_s^1 t dx \quad (5.8)$$

$$F^{\parallel} = \frac{\Delta Z}{\lambda} (n_a^{\parallel} - n_L) A$$

حيث A هو متوسط مساحة المقطع العرضي الشعيرة ، وتعطى المعادلات (١-٥) ،
(١٠-٥) (١١-٥) قيمة معاملات الانكسار المتوسط n_a^{\perp} ، n_a^{\parallel} والانكسار المزدوج المتوسط
: Δn_a

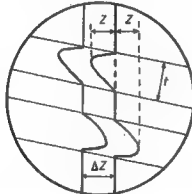
$$n_a^{\parallel} = n_L + \frac{F^{\parallel} \lambda}{\Delta Z A} \quad (5.9)$$

$$n_a^{\perp} = n_L + \frac{F^{\perp} \lambda}{\Delta Z A} \quad (5.10)$$

$$\Delta n_a = \left(\frac{F^{\parallel} - F^{\perp}}{\Delta Z} \right) \frac{\lambda}{A} \quad (5.11)$$

ويعتمد اتجاه إزاحة الهدبة عندما تعبر الحد الفاصل بين السائل والشعيرة على قيمة معامل إنكسار الشعيرة بالنسبة لمعامل انكسار سائل الغمر المستخدم ، فهذه التداعيل المستقيمة في منطقة السائل تزاح إلى أعلى أو إلى أسفل عند عبورها للشعيرة .

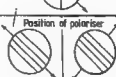



ويوضح الشكل رقم (٧/٥) مبدأ التداعيل الضوئي ، وفيه تظهر صورة مزدوجة للشعيرة ظهرت فيها إزاحة الهدبة في اتجاهين متضادين ، والجدير بالذكر أنه لزيادة دقة القياس يؤخذ في الاعتبار المسافة $2Z = (Z_1 + Z_2)$ بدلا من قياس الإزاحة في إحدى الصورتين فقط .



شكل رقم (٧/٥) : صورة مزدوجة لشعيرة سمكها t ، وإزاحة الهدب داخلها Z والبعد بين هذبتين متطبتين ΔZ .

ويمكن استخدام الضوء احادى طول الموجة والضوء الأبيض مع ميكروسكوب بلوت ، ويستخدم الأخير أساسا لتحديد موقع الهدبة الصفيرة Acromatic fringe ، ويبين الشكل

رقم (٣/٥) هيب التداخل الضوئي عندما تعبر شعيرة متجانسة مغمورة في سائل معامل انكساره n_T ، وقد ظهرت في هذا الشكل الصورة المزبوجة للشعيرة .

Condition	Analysar	Notes
		After rotation fringe deviation
$n^B > n^A > n_L$		Not reversed
$n^B > n_L > n^A$		Reversed
$n_L > n^B > n^A$		Not reversed

شكل رقم (٣/٥) : اتجاه إزاحة الهيب عبر شعيرة متجانسة معامل انكسار مادتها n^A ، n^B مغمورة في سائل معامل انكساره n_T .

وعند فحص شعيرات ذات مقطع عرضي دائري تتكون من قشرة ولب تظهر هيب التداخل الضوئي كما في الشكل (٤/٥) ، وفي حالة الشعيرة المتجانسة ذات المقطع العرضي الدائري تظهر إزاحة الهيب على شكل نصف قطع ناقص لها أنصاف المحور الأساسيين (a & b) حيث :

$$a = r_F = t/2 \quad \text{and} \quad b = \delta Z \quad \text{at } x = 0 \quad (\text{Barakat, 1971})$$

والمساحة تحت إزاحة الهيب المحصورة بين $x = +r_F$ و $x = -r_F$ هي $F = \frac{\pi ab}{2}$.

بينما مساحة المقطع العرضي للشعيرة A يساوي $\pi t^2/4$ كما هو موضح بالشكل (٥/٥) .

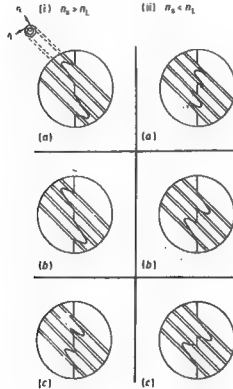
وبالتعويض في المعادلات (٩/٥) ، (١٠/٥) ، (١١/٥) يتج أن :

$$n_{\parallel} - n_{\perp} = \frac{(\delta Z)_{x=0}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{t}$$

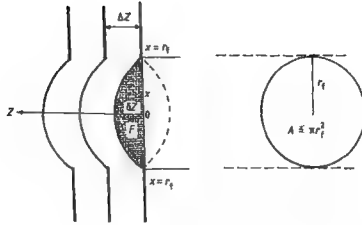
ونحصل على معادلة مشابهة في حالة n^{\perp} . وتعطى المعادلة الآتية معامل الانكسار

المزيج :

$$\Delta n_s = \frac{(\delta Z^{\parallel} - \delta Z^{\perp})_{x=0}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{t}$$



شكل رقم (٤/٥) : محور مزيجية لشعيرة مغمورة في سائل معامل انكسار n_L باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي المستقطب ويوضح شكل هذب التداخل الضوئي عبر شعيرة إسطوانية نصف قطر لها n_C ومعامل انكسار مادته n_C ونصف قطر قشرتها n_S ومعامل انكسار مادته n_S . ويظهر في الشكل حالتان (١) عندما تكون $n_L > n_S$ ، (٢) عندما تكون $n_S < n_L$. ويوجد في كل حالة ثلاث احتمالات (١) $n_C > n_S$ (ب) $n_C = n_S$ (ج) $n_C < n_S$ (من (Hamza, 1986)).



شكل رقم (٥/٥) : هيب التداخل هير شعيرة إسطوانية متجانسة .

وتستخدم هذه المعادلة في حالة مقياس التداخل الضوئي أحادي المسار .

وعند استخدام مقياس التداخل الضوئي ثنائي المسار كما في حالة فمر شعيرة متجانسة في سائل محصور بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر (Wedge) فتكون المعادلة كالآتي :

$$\Delta n_a = \frac{(Z'' - Z')}{\Delta Z} \frac{x=0}{2t} \lambda$$

وعند فحص شعيرة متجانسة ذات مقطع عرضي غير منتظم باستخدام مقياس تداخل ضوئي ثنائي المسار تستخدم المعادلة :

$$n_a - n_L = \frac{F}{\Delta Z} \frac{\lambda}{2MA}$$

لتعيين معامل الانكسار المتوسط للشعيرة ، حيث M هي تكبير الصورة -

Sokker & Shahin, 1985, and Wilkes, 1985.

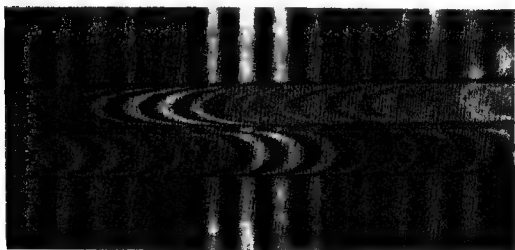
وتصل دقة قياس فرق طول المسار الضوئي باستخدام منشور ولاستون إلى حوالي 0.05λ حيث λ هي طول موجة الضوء المستخدم ، وعلى ذلك لايزيد الخطأ في تعيين معامل الانكسار والانكسار المزوج على $0.001 - 0.003$ وفي تعيين قطر شعيرة هو حوالي 1 ميكرومتر - (Pluta) (١٩٧٢) . وتوضح صور التداخل الضوئي microinterferograms

الآتية سلوك هذب التداخل الضوئى عندما تعبر الشعيرة وكيفية استخراج المعلومات من هذه الصور . وقد استخدم ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا وكذلك ميكروسكوب الانتزفاكو Interphako لدراسة الألياف التركيبية . والصور الآتية هى حمصيلة استخدام ميكروسكوب بلوتا فى دراسة ألياف البولى بروبيلين والكفلار والكربنل (ألياف عديد الأكريلك) .

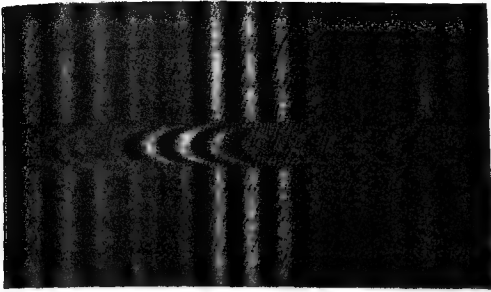
وقد استخدم ميكروسكوب الانتزفاكو فى دراسة ألياف البولى إيثيلين وألياف البولى استر . ويبين الشكل (٥/١/ب) صورتين للتداخل الضوئى لألياف البولى بروبيلين - نسبة مسح ٥ , ٢ - باستخدام ضوء أبيض مع ميكروسكوب التداخل الضوئى لتكوين صورة مزبوجة (رقم أ) وصورة غير مزبوجة تقاضلية تعطى الانكسار المزنوج (رقم ب) .

ويبين الشكل (٥/٧) صورة هذب التداخل الضوئى لنفس الشعيرة باستخدام سائل معامل انكساره يساوى ١ , ٤٨٠٠ عندما يستخدم ضوء طول موجته $\lambda = ٥٤٦$ نانومتر .

ويبين الشكل رقم (٥/٨/أ) صورة غير مزبوجة لألياف الكفلار ١٧ باستخدام الضوء الأبيض - لاحظ أن إزاحة الهدبة داخل الشعيرة تزيد على ثمانية عشر رتبة تداخل ضوئى . وفى الشكل رقم (٥/٨/ب) ظهرت الصورة المزنوجة للشعيرة من الألياف الكفلار باستخدام الضوء أحادى طول الموجة ($\lambda = ٥٤٦$ نانومتر) من ميكروسكوب بلوتا .



شكل ٥/١ (أ)

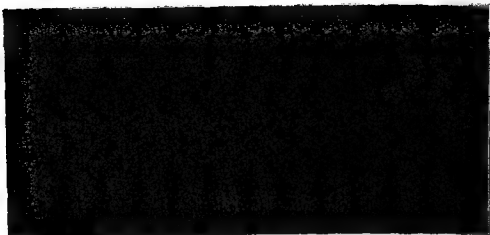


(ب)

شكل رقم (١/٥) : صور مزوجة (أ) وصور غير مزوجة تفاضلية (ب) تعطى الانكسار المزدوج لشعيرة البولي بروبيلين المشدودة بنسبة سحب ٠,٢ وذلك باستخدام ميكروسكوب بلوتا مع الضوء الأبيض وسائل معامل انكساره ١,٤٨٠٠ عند ١٧° م .

ويوضح الشكل رقم (٩/٥) صورة مزوجة لألياف النايلون ٦ - منتج مصري - باستخدام الضوء الأبيض مع ميكروسكوب بلوتا ، بينما يوضح الشكل رقم (١٠/٥) الصورة المزوجة لألياف الكورتل باستخدام الضوء الأبيض مع ميكروسكوب بلوتا .

واستخدم ميكروسكوب الانتزفاكو Interphako للتداخل الضوئي في قياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف ، ويوضح الشكل رقم (١١/٥) صورة التداخل الضوئي لشعيرة من ألياف البولي إيثيلين ، باستخدام الضوء الأبيض الذي يتذبذب في مستوى عمودي على محور الشعيرة ، بينما يوضح الشكل (١١/٥) صورة التداخل الضوئي لنفس الشعيرة عندما يستخدم ضوء أحادي طول الموجة ($\lambda = ٥٨٩,٣$ نانومتر) ، ويتذبذب في مستوى مواز لمحور الشعيرة .

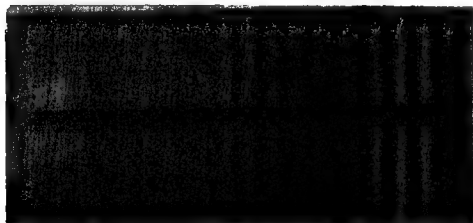


(١)

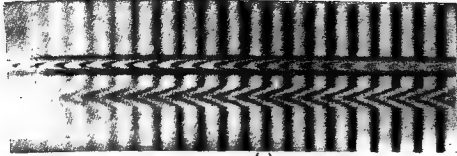


(ب)

شكل رقم (٧/٥) : يوضح الشكل السابق عند استخدام ضوء أحادي طول الموجة عند $\lambda = ٥٤٦$ نانومتر

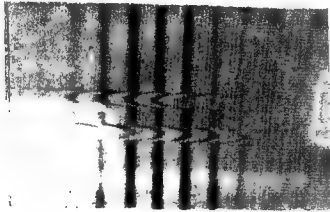


شكل ٨/٥ (١)

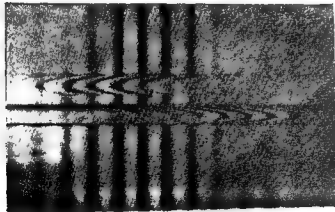


(ب)

شكل رقم (٨/٥) : (أ) صورة غير مزوجة تفاضلية لشعيرة من ألياف الكفاز . ويلاحظ أن إزاحة الهدبة أكبر من إزاحة ١٨ رتبة (ب) صورة مزوجة لنفس الشعيرة باستخدام ميكروسكوب بلوتا عند الطول الموجي $\lambda = 646$ نانومتر .



شكل رقم (٩/٥) : صور مزوجة لشعيرة نايلون ٦ باستخدام ميكروسكوب بلوتا مع الضوء الأبيض وسائل معامل انكساره $1,508$ عند 15° .



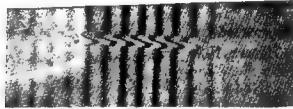
شكل رقم (١٠/٥) : صور مزوجة لشعيرة من ألياف الكورتل باستخدام ميكروسكوب بلوتا وسائل معامل انكساره $1,508$ عند 15° .

ويوضح الشكل رقم (١٢/٥) صورة التداخل الضوئي لشعيرة من ألياف البولي استر باستخدام الضوء أحادي طول الموجة ($\lambda = 81.3$ نانومتر) الذي يتذبذب في مستوى مواز لمحور الشعيرة (أ) ، وفي الاتجاه العمودي عليه (ب) .

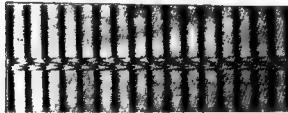
٣/٥- الانكسار المزدوج الجانبي للألياف : Lateral birefringence of fibres

أفاد "Morton and Hearle" (١٩٧٥) أن معاملات انكسار شعيرة للضوء قد تختلف من منطقة لأخرى عبر المقطع العرضي للشعيرة ، وتكون الألياف في هذه الحالة متباينة الخواص الضوئية خلال هذا المقطع ، وذلك يكون لها انكسار مزدوج جانبي Lateral birefringence .

وعين "Faust" (١٩٥٦) معاملات الانكسار n_a^{\perp} , n_a^{\parallel} بطريقة التداخل الضوئي لألياف رايون الفسكوز - غير المشدودة - وذلك عند تقط مختلفة على امتداد قطر الشعيرة بدءاً من أحد حوافها إلى حافتها الأخرى .

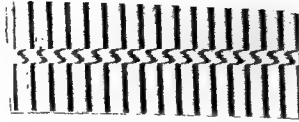


(أ)



(ب)

شكل رقم (١١/٥) : (أ) هدب التداخل الضوئي عبر شعيرة من ألياف البولي إيثيلين باستخدام ميكروسكوب الانتيرفاكو مع الضوء الأبيض الذي يتذبذب في مستوى عمودي على محور الشعيرة (ب) محور مزدوجة لنفس الشعيرة عند استخدام ضوء أحادي طول الموجة عند $\lambda = 81.3$ نانومتر ويتذبذب في مستوى مواز لمحور الشعيرة .



(أ)



(ب)

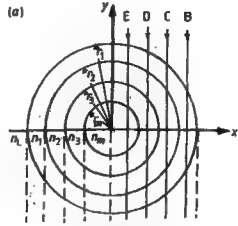
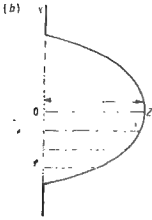
شكل رقم (١٢/٥) : هدب التداخل الضوئي عبر شعيرة من ألياف البولي استر باستخدام ميكروسكوب الانترفاكو مع ضوء أحادي طول الموجة عند $\lambda = 89.3$ نانومتر يتذبذب في مستوى يوازي محور الشعيرة ، (ب) في المستوى العمودي عليه (من Hamza, 1986)

ويوجد "Faust" أن قيم n_a تكون ثابتة (في حدود ± 0.0001) بينما قيم n_a^{\perp} تكون أعلى عند حواف الشعيرة عن قيمتها عند مركز الشعيرة بمقدار 0.0015 واستخدم Warner (١٩٨٣) ميكروسكوب التداخل الضوئي الثنائي ليتز Leitz لدراسة معامل الانكسار المزيج الجانبي لألياف الكفلاز .

وقام "Hamza et al" (١٩٨٩) بدراسة تحليلية لهدب التداخل الضوئي الثنائي عندما تعبر شعيرة إسطوانية متعددة الطبقات ، وفيما يلي شرح لهذه الطريقة :

يوضح الشكل (١/١٣/٥) المقطع العرضي لشعيرة إسطوانية متعددة الطبقات (عدد طبقاتها m) ومنتظمة الشكل ومغمورة في سائل معامل انكساره n_L ، وكان المقطع العرضي للشعيرة في المستوى (x, y) ومعامل انكسار الطبقة رقم m هو n_m ، حيث n_1 هو معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة ، $n_m = n_{core}$ هو معامل انكسار الطبقة الداخلية ، ويعطى نصف قطر كل طبقة من طبقات الشعيرة بالمعادلة :

$$r_Q = (y_Q^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}, \quad Q = 1, 2, 3, \dots$$



شكل رقم (١٣/٥) : (أ) مقطع في شعيرة إسطوانية متعددة الطبقات (ب) إزاحة الهدب في الشعيرة الإسطوانية

ويوضح الشكل (١/١٣/٥) مسار حزمة متوازية من الضوء أحادي طول الموجة ذات الطول الموجي λ سقطت موازية للمحور y . وتعطى المعادلة (١٢-٥) الفرق في طول المسار الضوئي (OPLD) optical path length difference خلال الشعيرة وسائل الغمر :

$$\begin{aligned} \Delta\Gamma = \text{OPLD} &= 2 \sum_{Q=1}^m (n_Q - n_{Q-1}) y_Q \\ &= 2 \sum_{Q=1}^m (n_Q - n_{Q-1}) (r_Q^2 - x^2)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (5.12)$$

ومن المعادلة (٤-٥) :

$$\frac{\lambda}{2\Delta Z} Z = \sum_{Q=1}^{Q=m} (n_Q - n_{Q-1}) (r_Q^2 - x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5.13)$$

حيث ΔZ هي المسافة بين كل هبتين في منطقة السائل ، Z هي قيمة إزاحة الهدب المناظرة للقيمة x الواقعة على نصف قطر الشعيرة في المستوى x, z كما هو موضح بالشكل (ب/١٣/٥).

ويعطى المعادلة رقم (١٤-٥) معامل الانكسار المزدوج فى اتجاه نصف القطر radial birefringence لشعيرة متعددة الطبقات ذات مقطع عرضى منتظم :

$$Z^{\parallel} - Z^{\perp} = \frac{2\Delta Z}{\lambda} \sum_{Q=1}^m (\Delta n_Q - \Delta n_{Q-1}) (r_Q^2 - x^2)^{1/2} \quad (5.14)$$

حيث Δn_Q تمثل قيمة معامل الانكسار المزدوج للطبقة رقم Q .

وقيمة إزاحة الهدبة ($Z^{\perp} - Z^{\parallel}$) هى قيمة إزاحة الهدبة فى حالة صورة التداخل الضوئى غير المزدوجة non-duplicated باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى - ميكروسكوب بلوتا مثلاً .

ونحصل على الانكسار المزدوج فى اتجاه نصف القطر radial birefringence لشعيرة مكونة من طبقتين (قشرة وب) بالتعويض فى المعادلة (١٤-٥) بالقيمة $Q = 2$.

وفى حالة الشعيرة متعددة الطبقات وذات مقطع عرضى غير منتظم تأخذ المعادلة رقم (٨-٥) الصيغة رقم (١٥-٥) :

$$F = \frac{\Delta Z}{\lambda} \sum_{Q=1}^m A_Q (n_Q - n_{Q-1}) \quad (5.15)$$

حيث :

$$F = \int_a^b Z dx \text{ and } A = \int_a^b t_Q dx.$$

ويمكن التوصل إلى هذه النتيجة بتكامل معادلة الشعيرة متعددة الطبقات ذات المقطع العرضى المنتظم للمنطقة $\alpha \leq x \leq \beta$ إذ أن $t_Q = y_Q$ ، وهى تعطى المساحة المحصورة تحت إزاحة الهدبة .

وفى عام (١٩٨٧) نشر " بلوتا Plota " طريقة جديدة لتحديد معامل الانكسار المزدوج للألياف الإسطوانية بوضع الشعيرة فى اتجاه قطرى diagonally بين مستقطبين متعامدين two crossed polarisers ومغمورة فى سائل . وعند إضاءة هذه الشعيرة بضوء أحادى طول الموجة مع ملاحظتها بميكروسكوب استخدم ضوء مستقطب إضاءة فتحة مستطيلة نحصل على نموذج للتداخل الضوئى من خلال شبيثة الميكروسكوب . وهذا

النموذج هو في الواقع تعبير عن تطبيق تحويلات فوريير في البصريات Fourier transform وهو يقدم طريقة جديدة لتعيين الانكسار المزدوج للألياف الإسطوانية . وذلك بالإضافة إلى إمكانية تعيين تفرق الضوء بواسطة الألياف وتغيره مع نصف قطر الشعيرة .
 ٥/٤- تطبيقات طرق التداخل الضوئي الثنائي على الألياف البصرية :

Applications of two-beam interferometric methods to optical fibres

يلخص الجدول رقم (١/٥) أسماء الباحثين الذين طبقوا طريقة التداخل الضوئي الثنائي لدراسة خواص الألياف البصرية ، وعلى وجه الخصوص بروفيل الألياف البصرية ذات لب معامل انكساره ثابت القيمة (STEP) ، و بروفيل الألياف البصرية ذات لب معامل انكساره يقل مع البعد عن مركز الشعيرة (GRIN) ، ويتضمن هذا الجدول الطرق التي اتبعها هؤلاء الباحثون ، وتم تجميع هذا الجدول من أعمال (Ghatak and Thyagarajan (1980), Okoshi (1982), Marcuse and Presby (1980).

٥/٤/١- طريقة التداخل الضوئي باستخدام شريحة على شكل قرص اقتطع من الشعيرة : Interferometric slab method

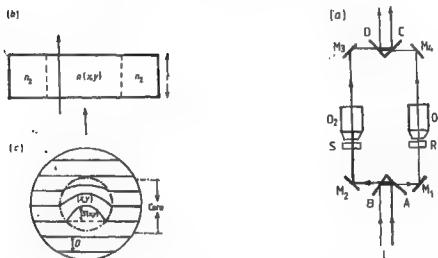
تحضر عينة القياس في هذه الطريقة بقطع قرص slab رقيق ذي سمك يتراوح بين ١ ، ٥ ، ١٠ ملليمتر من الشعيرة . ويتم صقل وجهي الشريحة ، حيث إن سمكها لا بد أن يكون ثابتا على امتداد مساحتها ويتغير لايزيد عن جزء من طول موجة الضوء المستخدم . وقياس بروفيل معامل انكسار الشعيرة يتم بإخلاق قرص الشعيرة في المسار الضوئي لأحد أذرع ميكروسكوب تداخل ضوئي ، كما هو موضح في الشكل (١/٤/٥) ، وتوضع شريحة عيارية متجانسة معامل انكسار مادتها n_2 في مسار الضوء في الذراع الآخر لميكروسكوب التداخل الضوئي شكل رقم (١/٤/٥ ب) . فإذا فرضنا أن قرص الشعيرة المراد إجراء القياسات عليه وقرص الشعيرة العيارية كانا متماثلين وكانت المرأتان تميلا على بعضهما قليلا ، فإنه في هذه الحالة تظهر هدب التداخل الضوئي على هيئة خطوط مستقيمة متوازية وثابتة البعد بين كل هدبتين متتاليتين ، وتتبع هذه الهدب قانون توزيع الشدة الضوئية للتداخل الثنائي .

ويوضع قرص الشعيرة المطلوب لدراسته في أحد أنوع مقياس التداخل الضوئي تظهر مجموعة هذب كما هو موضح بالشكل (١٤/٥) ، وتعتمد إزاحة الهدبة $S(x,y)$ على موقعها في لب الشعيرة ، ويعتمد فرق الطور النسبي relative phase difference على التخلف في الطور phase retardation بين قرص الشعيرة تحت الفحص وقرص الشعيرة العياري طبقا للمعادلة رقم (١٦-٥) .

$$\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} (n(x,y) - n_2) t \quad (5.16)$$

$$\frac{2\pi}{D} = \frac{\Psi}{S(x,y)} \quad (5.17)$$

حيث D تمثل المسافة بين كل هدبتين متوازيتين متتاليتين :



شكل (رقم ١٤/٥) : (أ) ميكروسكوب التداخل الضوئي ثنائي الأشعة ، أحادي المسار تمثل L حزمة الأشعة الساقطة M_4, M_3, M_2, M_1 مرابيا ، القرص S ، القرص R ، القرص العياري ، O_2, O_1 شبيئتا الميكروسكوب ، D, C, B, A ، مرابيا نصف عاكسة . (ب) قرص سمكه t لشعيرة متدرجة معامل إنكسار n_2 لبها ومعامل إنكسار قشرتها n_1

(ج) هذب التداخل حيث إزاحة الهدبة $S(x,y)$ في اللب يعتمد على موقع القياس واحداثياته x,y كما هو موضح

Table 5.1 Interferometric determination of the optical properties of optical fibres.

Authors	Methods	Results
Rawson and Murray (1973)	Interference between light reflected at both ends of the fibre	Determination of graded-index fibre parameters, C_4 and C_6 , in $n^2(r) = n_0^2 (1 - \delta^2 r^2 + C_4 \delta^4 r^4 + C_6 \delta^6 r^6 + \dots)$
Martin (1974)	Interferometric slab method using a Michelson-type interference microscope	Index profile
Presby and Brown (1974)	Interferometric slab method	Graded-index profile, accuracy in index data to a few parts in 10^7 and a spatial resolution of 2 μm
Cheris <i>et al</i> (1974)	Interferometric slab method using a Mach-Zehnder system (Leitz interference microscope)	Refractive index measurement of three Corning multimode optical fibres
Burrus and Standley (1974)	Interferometric slab method	Viewing refractive index profiles and small-scale inhomogeneities in glass optical fibres
Burrus <i>et al</i> (1973)	Interferometric slab method	Refractive index profiles of some low-loss multimode optical fibres
Stone and Burrus (1975)	Interferometric slab method	Focusing effects in interferometric analysis of graded-index optical fibres
Presby and Kamiasow (1976)	Interferometric slab method	Measured $dn/d\lambda$ for $0.5 < \lambda < 1.9 \mu\text{m}$ with accuracy of 1 part in 10^5
Wonsiewicz <i>et al</i> (1976)	Interferometric slab method	Quick determination of index profiles by machine aided method for the interpretation of interferograms
Presby <i>et al</i> (1978)	Interferometric slab method using a two-beam single-pass interference microscope	Automatic index profiling
Shirafski <i>et al</i> (1975)	Mach-Zehnder with light passing perpendicular to fibre axis	Index profile of graded-index fibres
Marble <i>et al</i> (1975)	Two-beam transverse interference microscopy	Analytical expressions for OPLD for graded-index fibres with quadric index profile
Marble and Gardner (1977)	Two-beam transverse interference microscopy	Index profile of graded-index. Determination of Δ and α of a fibre having a power law profile
Iga and Kokubun (1977, 1978)	Two-beam interference with light incident perpendicular to fibre axis	Graded-index profile, considering effect of refraction of the ray as it passes through the fibre
Kokubun and Iga (1977, 1978)	Two-beam interference with light incident perpendicular to fibre axis	They derived successive approximation formulae for calculating index profile
Iga <i>et al</i> (1976)	Differential interferometry (shearing). One beam is laterally shifted by a shearing device in a Mach-Zehnder interferometer	Measurement of index distribution of focusing fibres
Boggs <i>et al</i> (1979)	Transverse profile automated with computer controlled video analysis	Index profile of graded-index
Presby <i>et al</i> (1979)	Rapid automatic index profiling of whole fibre samples	Index profile of graded-index

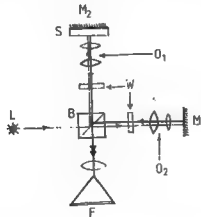
$$(n(x,y) - n_2) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\psi}{t} \quad (5.18)$$

$$n(x,y) = n_2 + \frac{\lambda}{2\pi} \frac{2\pi S(x,y)}{Dt} = n_2 + \frac{\lambda S(x,y)}{Dt} \quad (5.19)$$

وتقاس قيمة ازاحة الهدبة بتسجيل صورة التداخل الضوئي على لوح فوتوغرافي ، ثم يستخدم ميكروسكوب يمكن تحريكه لقياس الأبعاد الدقيقة travelling microscope للقياس .
ويطبق المعادلة (١٩-٥) عند استخدام ميكروسكوب تداخل ضوئي عند النفاذ transmission-type تعبر الأشعة العينة مرة واحدة . أما في حالة ميكروسكوب التداخل الضوئي الذى يتبع نظام ميكلسون Michelson type والموضح فى الشكل (١٥/٥) - Cherin, 1983 - حيث تمر الأشعة خلال العينة مرتين فيلزم تطبيق المعادلة الآتية :

$$\Delta n(x,y) = \frac{S(x,y)}{D} \frac{\lambda}{2t} \quad (5.20)$$

وتكون أقل قيمة لمقدار $S(x,y)$ يمكن فصلها فراغيا spatial resolution بهذه الطريقة هي $0.7 \mu m$ ودرجة الدقة فى تعيين Δn تساوى $\pm 5 \times 10^{-4}$ (Martin, 1974) .



شكل (رقم ١٥/٥) : النظام البصرى لقياس يروفيل معامل انكسار الألياف باستخدام مقياس التداخل الضوئى القائم على نظام ميكلسون . حيث L المصدر الضوئى ، B مجزئ الحزمة الضوئية ، O_1 ، O_2 شبيثتا الميكروسكوب ، M_1 ، M_2 مرآتان ، S قرص الصغيرة ، W جهاز لإزالة جبهة الموجة Wavefront tilting .

وتكون دقة القياس في طريقة التداخل الضوئي باستخدام قرص من الشعيرة عمليا محدودة ومرتبطة بدقة الطريقة التي تستخدم لقياس سمك القرص ودرجة حقل وتوازي وجهي هذا القرص . كما أن هذه الطريقة إتلافية destructive للألياف ، وتحتاج إلى وقت طويل لتحضير العينات . ومصدر الخطأ الأساسي في هذه الطريقة هو تأثير انحناء الأشعة أثناء مرورها بالقرص ، خاصة عندما يكون سمك القرص كبيرا وغير مصقول جيدا .

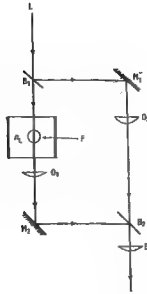
٥/٢- تعيين بروفايل معامل الانكسار للألياف البصرية باستخدام هذب التداخل الناتجة من سقوط الضوء مستعرضا على الشعيرة :

Index profile of optical fibres from their interference patterns

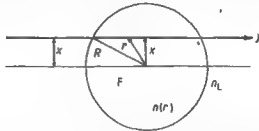
تم تطبيق طريقة التداخل الضوئي الثنائي على الألياف بسقوط الضوء مستعرضا أي عموديا على محور الشعيرة . وفي هذه الطريقة توضع العينة في أحد مساري الضوء لقياس التداخل الضوئي لماخ وزندر Mach-Zahnder ، ويوضح الشكل (١٦/٥) النظام البصري المستخدم .

وتعتبر الأشعة الشعيرة عمودية على محورها . وتغمس الشعيرة في محلول matching liquid معامل انكساره n_L يساوي معامل انكسار قشرة الشعيرة n_{clad} تقريبا . وفي هذه الحالة تمر الأشعة دون انكسار خلال قشرتها ، وبذلك يمكن تعيين الإزاحة في طور الأشعة phase shift في لب الشعيرة . ويبين الشكل (١٧/٥) شعيرة مغمورة في سائل مضاهاة - Shiraishi et al., 1975 .

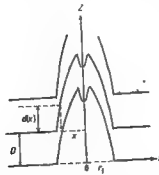
وبالشكل رقم (١٨/٥) لشعيرة منتظمة حول محورها ، حيث تمر الأشعة مستقيمة خلال هذه الشعيرة وتكون إزاحة الهدية كما هو موضح بهذا الشكل .



شكل (رقم ١٦/٥) : مقياس التداخل لماخ وزندر باستخدام حزمة من الأشعة الضوئية ساقطة عمودية على محور الشعيرة ، يمثل L المصدر الضوئي ، M_1, M_2 مرآتان ، O_1, O_2 شبيثتان للميكروسكوب ، B_1, B_2 مجزآن للحزمة الضوئية ، E عينية ، F شعيرة مغمورة في سائل مضاهاة .



شكل (رقم ١٧/٥) : شعيرة مغمورة في سائل مضاهاة حيث F تمثل الشعيرة $n(r)$ معامل انكسارها ، n_L معامل انكسار سائل المضاهاة .



شكل (رقم ١٨/٥) : هدف التداخل الضوئي عين شعيرة نصف قطرها r_F ، ويمثل محورها بالاتجاه Z .

وتعطى المعادلة رقم (٢١-٥) الزيادة فى إزاحة طور الأشعة excess phase shift :

$$Q(x) = 2K \int_x^{\infty} \frac{\Delta n(r) r dr}{(r^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.21)$$

حيث

$$\Delta n(r) = n(r) - n_L$$

و R هو نصف قطر قشرة الشعيرة :

$$Q(x) = 2\pi \frac{d(x)}{D}$$

حيث D هي المسافة بين هديتين متوازيتين متتاليتين ، d هي المسافة التي اختيرت ليتم

منها القياس ، وبذلك يكون :

$$d(x) = \frac{2D}{\lambda} \int_x^{\infty} \frac{\Delta n(r) r dr}{(r^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.22)$$

وهي صيغة تكامل أبيل Abel's integral ، ويمكن أن تحل بسهولة بتعكاس أبيل's Abel's

inversion كما سيأتى ذلك فى الفصل الحادى عشر .

٢/٤- طريقة التداخل الضوئى التفاضلى : Differential interferometry

طور إيجا ومجموعته "Iga et al" عام (١٩٧٨) مقياس التداخل الضوئى لماخ وزندر بإضافة جهاز قص shearing device بينى داخل ميكرومكوب التداخل الضوئى ، ويوضح الشكل (١٩/٥) مسار الضوء فى مقياس التداخل الضوئى ، ويمكن ملاحظة نموذج التداخل الضوئى الناتج من شعاعين مر كلاهما بالشعيرة . ويؤاح أحد الشعاعين جانبها لمسافة صغيرة s ، وما يظهر كإزاحة للهدبة هو الفرق فى الطور بين الشعاعين اللذين يمران خلال الشعيرة عند x ، x+s ، كما هو موضح بالشكل (٢٠/٥) .

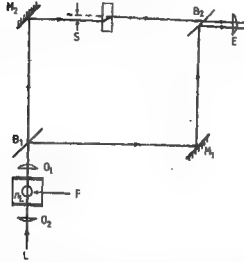
$$Q_s = Q(x+s) - Q(x)$$

وعندما تكون قيمة s صغيرة :

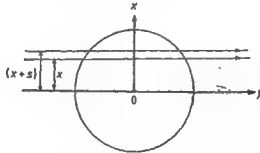
$$Q_s = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{Q(x+s) - Q(x)}{s} = \frac{d(Q(x))}{dx} s. \quad (5.23)$$

نحصل على الإزاحة $ds(x)$ من المعادلة :

$$d_s(x) = \frac{D}{2\pi} \frac{d(Q(x))}{dx} s. \quad (5.24)$$



شكل (رقم ١٩/٥) : مقياس التداخل لماخ وزندر القاسم المستخدم في التداخل الضوئي التفاضلي
(مكوناته كما في الشكل (١٦/٥) ويمثل S جهاز القص shearing).



شكل (رقم ٢٠/٥) : إسهام شعاعين في تكوين هيب التداخل التفاضلي النتائج من القص .

وبمقارنة المعادلة الأخيرة بمعادلة إزاحة الطور الإضافية في قرص عازل dielectric ذي

سمك d حيث :

$$Q = 2\pi d/D$$

نجد أن :

$$d_s(x) = \frac{d(d(x))}{dx} s.$$

ونحصل على توزيع معامل الانكسار $n(r)$ باستخدام المعادلة (٢٥-٥) ، وفي هذه الحالة تكون طريقة التداخل الضوئي التفاضلي (shearing differential) هي طريقة مباشرة إذا ما قورنت بالمعادلة (٢٢-٥) .

$$\Delta n(r) = -\frac{\lambda}{\pi D_s} \int_r^R d_s(x) \frac{dx}{(x^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.25)$$

References

- Barakat N 1971 *Textile Res. J.* **41** 167
 Blakey P R, Montgomery D E and Sumner H M 1970 *J. Textile Inst.* **61** 234
 Boggs L, Presby H M and Marcuse D 1979 *Bell Syst. Tech. J.* **58** 867
 Bunn C W and Daubeny P 1954 *Trans. Faraday Soc.* **50** 1173
 Burrus C A, Chinnock E L, Gloge D, Holden W S, Li T, Standley R D and Keck D B 1973 *Proc. IEEE* **61** 1498
 Burrus C A and Standley R D 1974 *Appl. Opt.* **13** 2365
 Cherin A H 1983 *An Introduction to Optical Fibres* (New York: McGraw-Hill)
 Cherin A H, Cohen L Q, Holden W S, Burrus C A and Kaiser P 1974 *Appl. Opt.* **13** 2359.
 Denbigh K G 1940 *Trans. Faraday Soc.* **36** 936
 Dorau K and Pluta M 1981a *Przegląd Włókienniczy* **35** 70
 ——— 1981 b *Przegląd Włókienniczy* **35** 128
 Faust R C 1956 *Q.J. Microsc. Sci* **97** 569
 Ghatak A and Thyagarajan 1980 *Progress in Optics* vol XVIII ed. E Wolf (Amsterdam : North-Holland) pp 100-9.
 Hamza A A 1980 *Textile Res. J.* **50** 731
 ——— 1986 *J. Microsc.* **142** 35
 Hamza A A and Abd El-Kader H I 1986 *Phys. Ed.* **21** 244
 Hamza A A and El-Dessouki T 1987 *Textile Res. J.* **57** 508
 Hamza A A and El-Farahaty K A 1986 *Textile Res. J.* **56** 580
 Hamza A A, Fouda I M and El-Farahaty K A 1986 *Int. J. Polym. Mater.* **11** 169

- Hamza A A, Kabeel M A and Shahin M M 1990 *Textile Res. J.* **60** 157
- Hamza A A and Sikorski J 1978 *J. Microsc.* **113** 15
- Iga K and Kokubun Y 1977 *Tech. Digest Int. Conf., IOOC Tokyo* p 403
- 1978 *Appl. Opt.* **17** 1972
- Iga K, Kokubun Y and Yamamoto N 1976 *Record of Natl. Symp. Light Radio Waves, IECE Japan* paper S3-1
- 1978 *Papers of Technical Group IECE Japan* no OQE 76-80
- Kokubun Y and Iga K 1977 *Trans. IECE Japan* E60 702
- 1978 *Trans. IECE Japan* E61 184
- McKee A and Woods H J 1967 *J. R. Microsc. Soc.* **87** 185
- McLean J H 1971 *Textile Res. J.* **41** 90
- Marcuse D and Presby H 1980 *Proc. IEEE* **68** 6
- Marhic M E, Ho P S and Epstein M 1975 *Appl. Phys. Lett.* **26** 574
- Martin W E 1974 *Appl. Opt.* **13** 2112
- Morton W E and Hearle J W S 1975 *Physical Properties of Textile Fibres* (London: The Textile Institute) pp 573-8
- Northolt M G 1974 *Europ. Polym. J.* **10** 799
- Okoshi T 1982 *Optical Fibres* (London: Academic)
- Pluta M 1965 *Przegląd Wtóknienniczy* **19** 261
- 1971 *Opt. Acta* **18** 661
- 1972 *J. Microsc.* **96** 309
- 1982 *Mikroskopia Optyczna* (Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe) (in Polish)
- Pluta M 1987 *J. Mod. Opt.* **34** 1451
- Presby H M and Brown W L 1974 *Appl. Phys. Lett.* **24** 511
- Presby H M and Kaminow I P 1976 *Rev. Sci. Instrum.* **47** 348
- Presby H M, Marcuse D and Astle H 1978 *Appl. Opt.* **14** 2209
- Presby H M, Marcuse D, Boggs L and Astle H 1979 *Bell Syst. Tech. J.* **58** 883
- Rawson E G and Murray R G 1973 *IEEE J. Quantum Electron.* QE-9 1114
- Saunders MJ and Gardner W B 1977 *Appl. Opt.* **16** 2369
- Shiraishi S, Tanaka G, Suzuki S and Kurosaki S 1975 *Record of Natl. Cnov., IECE Japan* **4** 239, paper 891
- Sikorski J 1984 *Proc. R. Microsc. Soc.* **19** 28 (Book review)

- Simmens S C 1958 *Nature* **181** 1260
- Sokkar T Z N and Shahin M M 1985 *Textile Res. J.* **55** 139
- Stone J and Burrus C A 1975 *Appl. Opt.* **14** 151
- Warner S B 1983 *Macromolecules* **16** 1546
- Wilkes J M 1985 *Textile Res. J.* **55** 712
- Wonsiewicz B C, French W G, Lazay P D and Simpson J R 1976 *Appl. Opt.* **15** 1048
- Żurek W and Zakrzewski S 1983 *J. Appl. Polym. Sci.* **28** 1277

الفصل السادس

تطبيق طرق التداخل الضوئي المتعدد على الألياف

Multiple-Beam Interferometry Applied to Fibrous Materials

١/٦- تكوين هدب التداخل الضوئي المتعدد وتطبيقاتها على الألياف :

Formation and application of multiple-beam interference fringes to fibres

طور « تولانسكي » سنة (١٩٤٤) طرق التداخل الضوئي المتعدد ، ونذكر فيما يلي طرق التداخل المستخدمة لدراسة الألياف :

١- طريقة فيزو للتداخل الضوئي عند النفاذ .

٢- طريقة فيزو للتداخل الضوئي عند الانعكاس .

٣- هدب التداخل الضوئي المتعدد متساوي الرتبة اللونية عند النفاذ وعند الانعكاس .

ومن المفيد عند دراسة التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس لفيزو أن نشرح هدب التداخل الضوئي المتعدد المتكونة عن طريق مسطحين ضوئيين مفضضين متوازيين تماما ، أي حالة مقياس التداخل لفابري وبيرو. ذلك لوجود تشابه كبير بين خواص النظامين . ويعتبر مقياس التداخل الضوئي لفابري وبيرو في الحالتين ١ ، ٢ حالة مثالية لطريقة فيزو للتداخل الضوئي ، وتوجد عدة تطبيقات لطرق التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس .

١/٦-١ نظام هدب التداخل الضوئي المتعدد المتكونة باستخدام مسطحين مفضضين متوازيين يحصران بينهما وسطا رقيقا منتظما السمك :

The case of multiple-beam interference fringe systems formed by a plane parallel silvered thin film of constant thickness :

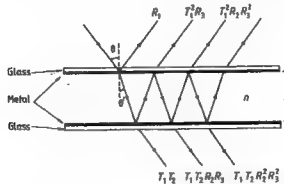
يبين الشكل رقم (١/٦) حزمة متوازية من ضوء أحادي طول الموجة سقطت على مسطحين ضوئيين متوازيين سطحهما الداخليان مفضضان ، وكان الشعاع الضوئي الساقط يميل بزاوية مقدارها θ على العمودى على السطح العلوى .

وتمطى المعادلة رقم (٦-١) محصلة الأشعة النافذة والتي نتجت بالانعكاس المتعدد من شريحة سمكها ثابت ومقداره t ومعامل انكسار مادتها n ومقطعة بطبقة معدنية عاكسة :

$$R_T = T_1 T_2 \exp [i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)] + T_1 T_2 R_2 R_3 \exp [i[(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2) + \Delta]] \\ + T_1 T_2 R_2^2 R_3^2 \exp [i[(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2) + 2\Delta]] + \dots \quad (6.1)$$

وتعرف الخواص الطورية phase properties لطبقة الغطاء المعدنية كالآتي :

β_1 التغير فى طور الأشعة عند الانعكاس زجاج / سطح الغطاء المعدنى للشريحة العليا المواجهة للضوء الساقط ، β_2, β_3 هما التغير فى الطور عند الانعكاس وسط / سطح الطبقة المعدنية ، أى عند الحد الفاصل بين الوسط والغطاء المعدنى وذلك للشريحتين العليا والسفلى على الترتيب ، γ_1, γ_2 هما التغير فى الطور عند النفاذ من الشريحتين العليا والسفلى على الترتيب ، R_1^2, R_2^2 هما شدة الضوء المنعكس عند السطح الفاصل زجاج / سطح معدنى ووسط / سطح معدنى على الترتيب ، R_3^2 هى شدة الضوء المنعكسة على السطح الفاصل وسط / سطح معدنى للشريحة السفلى ، T_1^2, T_2^2 هما شدة الضوء النافذة خلال الطبقة المعدنية للشريحتين العليا والسفلى على الترتيب Δ ، هى فرق الطور الثابت بين كل شعاعين متتاليين ، ω هى التردد .



شكل رقم (١/٦) : مسار الأشعة المكونة لهذب التداخل الضوئى المتعدد فى شريحة رقيقة سمكها ثابت عند النفاذ وعند الانعكاس

وينتج من المعادلة رقم (١-٦) أن :

$$R_T = T_1 T_2 \left(\frac{1}{1 - R_2 R_3 \exp(i\Delta)} \right) \exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)] \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} R_T &= T_1 T_2 \left(\frac{1 - R_2 R_3 \exp(-i\Delta)}{[1 - R_2 R_3 \exp(i\Delta)][1 - R_2 R_3 \exp(-i\Delta)]} \right) \times \\ &\quad \exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)] \\ &= T_1 T_2 \left(\frac{1 - R_2 R_3 \cos \Delta + iR_2 R_3 \sin \Delta}{1 + R_2^2 R_3^2 - R_2 R_3 \exp(-i\Delta) - R_2 R_3 \exp(i\Delta)} \right) \times \\ &\quad \exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)] \\ R_T &= T_1 T_2 \left(\frac{1 - R_2 R_3 \cos \Delta + iR_2 R_3 \sin \Delta}{1 + R_2^2 R_3^2 - R_2 R_3 [\exp(i\Delta) + \exp(-i\Delta)]} \right) \times \\ &\quad \exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)] \\ &= T_1 T_2 \left(\frac{1 - R_2 R_3 \cos \Delta + iR_2 R_3 \sin \Delta}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \right) \exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)] \\ R_T &= A_T \exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2 + \Delta_T)] \quad (6.3) \end{aligned}$$

حيث A_T هي سعة المحصلة ، Δ_T هي فرق طورها بالنسبة للشعاع الأول النافذ

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{2\pi}{\lambda} (2nt \cos \theta) + \beta_3 + \beta_2 \\ &= \delta + \beta_3 + \beta_2 \end{aligned}$$

وتعطى المعادلة الآتية شدة الضوء :

$$\begin{aligned} I_T &= A_T^2 \\ &= T_1^2 T_2^2 \left(\frac{(1 - R_2 R_3 \cos \Delta + iR_2 R_3 \sin \Delta)(1 - R_2 R_3 \cos \Delta - iR_2 R_3 \sin \Delta)}{(1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2)^2} \right) \\ &= T_1^2 T_2^2 \left(\frac{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2}{(1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2)^2} \right) = \frac{T_1^2 T_2^2}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \quad (6.4) \end{aligned}$$

$$\tan \Delta_T = \frac{R_2 R_3 \sin \Delta}{1 - R_2 R_3 \cos \Delta}$$

٢/١/٦- توزيع الشدة الضوئية لهدب فابري وبيرد للتداخل الضوئي المتعدد عند الانعكاس

The intensity distribution of multiple-beam Fabry-Perot fringes at reflection:

تعطى المعادلة الآتية محصلة هدب فيزيو للتداخل الضوئي المتعدد عند الانعكاس :

$$R_R = R_1 \exp [i(\omega t + \beta_1)] + T_1^2 R_3 \exp [i(\omega t + 2\gamma_1 + \beta_3 + \delta)] \\ + T_1^2 R_2 R_3^2 \exp [i(\omega t + 2\gamma_1 + \beta_2 + 2\beta_3 + 2\delta)] + \dots$$

Putting $\Delta = \delta + \beta_2 + \beta_3$ and $F = 2\gamma_1 - \beta_1 - \beta_2$ we get

$$R_R = R_1 \exp [i(\omega t + \beta_1)] + T_1^2 R_3 \exp [i(\omega t + \beta_1)] \exp [i(F + \Delta)] \\ + T_1^2 R_2 R_3^2 \exp [i(\omega t + \beta_1)] \exp [i(F + 2\Delta)] + \dots \\ = \{ R_1 + T_1^2 R_3 \exp [i(F + \Delta)] [1 + R_2 R_3 \exp (i\Delta) + R_2^2 R_3^2 \exp (i2\Delta) + \dots] \} \times \\ \exp [i(\omega t + \beta_1)] \\ = \left[R_1 + T_1^2 R_3 \exp [i(F + \Delta)] \left(\frac{1 - R_2 R_3 \exp (-i\Delta)}{[1 - R_2 R_3 \exp (i\Delta)][1 - R_2 R_3 \exp (-i\Delta)]} \right) \right] \times \\ \exp [i(\omega t + \beta_1)] \\ = \left[R_1 + T_1^2 R_3 \left(\frac{\exp [i(F + \Delta)] - R_2 R_3 \exp (iF)}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \right) \right] \exp [i(\omega t + \beta_1)] \\ R_R = \left[R_1 + T_1^2 R_3 \left(\frac{\cos (F + \Delta) - R_2 R_3 \cos F + i \sin (F + \Delta) - i R_2 R_3 \sin F}{(1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2)} \right) \right] \times \\ \exp [i(\omega t + \beta_1)]$$

$$= \left[R_1 + T_1^2 R_3 \left(\frac{\cos (F + \Delta) - R_2 R_3 \cos F + i [\sin (F + \Delta) - R_2 R_3 \sin F]}{(1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2)} \right) \right] \times \\ \exp [i (\omega t + \beta_1)] \\ = \left(R_1 + \frac{T_1^2 R_3 [\cos (F + \Delta) - R_2 R_3 \cos F]}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} + i \frac{T_1^2 R_3 [\sin (F + \Delta) - R_2 R_3 \sin F]}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \right) \times \\ \exp [i (\omega t + \beta_1)].$$

$$I_R = \left(R_1 + \frac{T_1^2 R_3 [\cos (F + \Delta) - R_2 R_3 \cos F]}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \right)^2 \\ + T_1^4 R_3^2 \left(\frac{\sin (F + \Delta) - R_2 R_3 \sin F}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \right)^2 \\ = R_1^2 \frac{T_1^4 R_3^2 + 2 T_1^2 R_1 R_3 \cos (F + \Delta) - 2 T_1^2 R_1 R_2 R_3^2 \cos F}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2}$$

وتعطي المعادلة الأخيرة توزيع الشدة الضوئية I_R لهدف التداخل الضوئي المتعدد عند الانعكاس لأي قيمة للمقدار F وهناك حالتان خاصتان :

$$F = (2m) \pi \text{ عند } -1$$

$$I_R = R_1^2 + \frac{T_1^4 R_3^2 + 2 T_1^2 R_1 R_3 \cos \Delta - 2 T_1^2 R_1 R_2 R_3^2}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \\ = R_1^2 - \frac{T_1^2 R_1}{R_2} + \frac{T_1^4 R_3^2 - T_1^2 R_1 R_2 R_3^2 + (T_1^2 R_1 / R_2)}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \\ = A - B + \frac{C}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2}$$

where

$$A = R_1^2$$

$$B = T_1^2 R_1 / R_2$$

and

$$C = T_1^4 R_3^2 - T_1^2 R_1 R_2 R_3^2 + T_1^2 R_1 / R_2$$

$$F = (2m + 1) \pi \quad \text{بـ وعند}$$

$$\begin{aligned} I_R &= R_1^2 + \frac{T_1^4 R_3^2 - 2 T_1^2 R_1 R_3 \cos \Delta + 2 T_1^2 R_1 R_2 R_3^2}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \\ &= R_1^2 + (T_1^2 R_1 / R_2) + \frac{T_1^4 R_3^2 - T_1^2 R_1 R_2 R_3^2 - (T_1^2 R_1 / R_2)}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \\ &= A + B - \frac{D}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \end{aligned}$$

where

$$D = (T_1^2 R_1 / R_2) - (T_1^4 T_3^2 + T_1^2 R_1 R_2 R_3^2)$$

٣/١/٦ - تحليل العناصر المحددة لشكل منحنى توزيع الشدة الضوئية :

Analysis of elements determining the shape of the intensity distribution

نذكر فيما يلي الأنظمة الثلاثة المتكونة بمقياس فابري وبيرو للتداخل الضوئي :

أ- نظام التداخل الضوئي المتعدد عند الانعكاس ، ويتميز بتكوين هدب حادة معتمدة على خلفية مضيئة .

ب- نظام التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ ويتميز بتكوين هدب مضيئة على خلفية معتمة .

جـ- هب التداخل الضوئي عند الانعكاس المشابه لهدب التداخل عند النفاذ في توزيع الشدة الضوئية Transmitted like fringes ذات شدة ضوئية قيمتها أعلى وكذلك خلفيتها بالمقارنة مع الحالة (ب) .

ويمكن إجراء التعميم الآتي على توزيع الشدة الضوئية لأي من الأنظمة الثلاثة المذكورة ، وذلك من الاعتبارات النظرية السابقة .

$$I = A + B + \frac{C}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2}$$

فبالنسبة للنظام (ب) عند النفاذ :

$$A = B = 0$$

$$C = T_1^2 T_2^2$$

وهي تمثل توزيع الشدة الضوئية الناتجة بتجميع أرى Airy summation ، حيث :

$$I_{\max} = \frac{T_1^2 T_2^2}{(1 - R_2 R_3)^2} \quad \text{for } \Delta = 2\pi S, S = 0, 1, 2, \dots$$

and

$$I_{\min} = \frac{T_1^2 T_2^2}{(1 + R_2 R_3)^2} \quad \text{for } \Delta = (2S + 1) \pi, S = 0, 1, \dots$$

وفي حالة النظام (أ) عند الانعكاس :

$$A = R_1^2$$

$$B = T_1^2 R_1 / R_2$$

$$C = - \left[\mp (T_1^2 R_1 / R_2) - T_1^4 R_3^2 \pm T_1^2 R_1 R_2 R_3^2 \right]$$

ومن الواضح أن توزيع الشدة الضوئية تحدده قيم A, B, C، وأن إسهام A هو شدة ضوئية منتظمة لجميع قيم Δ ، وهذا هو أيضا الحالة لإسهام B إذا كانت قيمتي A, B موجبتين ، وبالتالي تكون النتيجة النهائية هي ارتفاع في الشدة الضوئية لجميع قيم Δ التي سوف تساوى تجميع الشدة الضوئية للمقابلة لـ (A + B) . أما إذا كانت قيمة B سالبة في حين أن |B| لا زال أقل من A ، فإن النتيجة النهائية هي ارتفاع في الشدة الضوئية لجميع قيم Δ مساو لـ (A-B) . ويعطى الحد الأخير في صيغة التعميم من الشدة الضوئية التي

تتغير بتغير Δ . ومن الواضح أن توزيع الشدة الضوئية للهدف المكونة من مقياس فابري ويبري يمثل تجميع أيرى ويعطى قيمة I_{min}, I_{max} عند $\Delta = 2 S \pi$, $\Delta = (2 S + 1) \pi$ على الترتيب . وفى حالة ما إذا كانت C موجبة فإن هدب التداخل المتكونة عند النفاذ والتي يعبر عنها الحد الأخير سوف تزاح إلى أعلى لجميع قيم Δ بمقدار $(A + B)$ كشدة ضوئية خلفية . وعندما تكون قيمة B سالبة والفرق موجبا تنخفض الشدة الضوئية للخلفية إلى $A - |B|$. أما إذا كانت C سالبة القيمة فى حين أن كلا من A, B موجبة وأن المرآة المستوية وضعت على محور Δ عند $I = (A+B)$ فإن النتيجة النهائية للحدود الثلاثة سوف تكون خطوطا حادة معتمدة على خلفية مضيئة ، التى هى صورة هدب التداخل عند النفاذ المكونة فى المرآة المستوية ويعبر عنها الحد الأخير . وفى هذه الحالة تكون قيمة I_{max} الناتجة من إسهام الحد الأخير أقل من $(A+B)$ ، إنها تساوى :

$$A + B - \left[C / (1 - R_2 R_3)^2 \right]$$

التي تحدث عندما تكون Δ تساوى $(2 S + 1) \pi$.

وكما سبق أن ذكرنا ، فإن إسهام $(A + B)$ هو شدة ضوئية لجميع قيم Δ لها قيمة ثابتة ، وأن الحد الأخير يعطى توزيع الشدة الضوئية $\frac{C}{(1 - 2R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2)}$ حيث :
لهدب التداخل عند النفاذ التى هى فى هذه الحالة قد طرحت من $(A + B)$ حيث :

$$I_{max} = \frac{C}{(1 - R_2 R_3)^2} \quad \text{at } \Delta = (2S + 1) \pi$$

وكذلك :

$$I_{min} = \frac{C}{(1 + R_2 R_3)^2} \quad \text{at } \Delta = 2S \pi$$

كما هو موضح فى الشكل رقم (٢/١) والنتيجة النهائية هى :

$$I_{max} = R_1^2 + (T_1^2 R_1 / R_2) - \frac{(T_1^2 R_1 / R_2) - (T_1^4 R_3^2 + T_1^2 R_1 R_2 R_3^2)}{(1 + R_2 R_3)^2}$$

$$= \left(R_1 + \frac{(T_1^2 R_3)}{(1 + R_2 R_3)} \right)^2 \quad \text{for } \Delta = (2S + 1) \pi$$

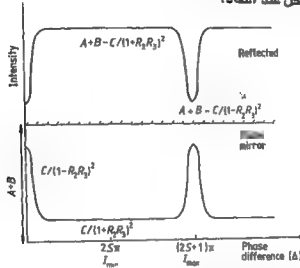
وكذلك :

$$I_{\min} = R_1^2 + (T_1^2 R_1 / R_2) - \frac{(T_1^2 R_1 / R_2) - (T_1^4 R_3^2 + T_1^2 R_1 R_2 R_3^2)}{(1 - R_2 R_3)^2}$$

$$= \left(R_1 - \frac{T_1^2 R_3}{(1 - R_2 R_3)} \right)^2 \quad \text{for } \Delta = 2S \pi$$

وفي حالة حجب الشعاع الأول فإن (A-B=0) وتصبح الحصلة النهائية هي توزيع الشدة

الضوئية لهيب التداخل عند النفاذ.



شكل رقم (٢/٦) : توزيع الشدة الضوئية لهيب التداخل المتعدد عند الانعكاس بحالتيه

١/٦- هيب التداخل الضوئي المتعدد المتكونة من مسطحين ضوئيين مفضضين يعمل أحدهما على الآخر أي المتكونة بالإسفين الضوئي :

Multiple-beam Fizeau fringes by a silvered wedge :

أجرى « تولانسكي Tolansky » عام (١٩٤٨) تحليلاً للمتطلبات اللازمة للحصول على هيب التداخل الضوئي لفيزن محددة الموضع المتكونة باستخدام مسطحين ضوئيين مفضضين يعمل أحدهما على الآخر (إسفين ضوئي). ونذكر أن تجميع إيرى Airy summation ينطبق فقط على الحالة التي يكون فيها الوسط المحصور منتظم السمك أما في حالة وسط متغير السمك كما في حالة الإسفين الضوئي الذي يحصر شريحة من الهواء فإنه يمكن الحصول على صيغة تقريبية لتجميع إيرى .

وأعطى تولايتسكى الفروق الجوهرية للأشعة المكونة لهذب التداخل الضوئي المتعدد فى
 ما لانهاية باستخدام مسطحين ضوئيين متوازيين ، والأشعة المكونة لهذب التداخل الضوئي
 المتعددة ومحددة الموقع . فالأشعة المتعاقبة والمنعكسة فى حالة الإسفين الهوائى لا يتبع فرق
 الطور بين أى شعاعين متعاقبين متوالية حسابية ، بينما هذه هى الحالة الشريحة المنتظمة
 السمك وفيها يكون فرق الطور Δ بين كل شعاعين متتاليين لا يعتمد على رتبة الأشعة المنعكسة
 ويعطى من المعادلة :

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (2nt \cos \theta) + \beta_2 + \beta_3$$

ولكن فى حالة الإسفين الهوائى المفضض تكون قيم تخلف الطور للأشعة المتعاقبة
 المنعكسة من المجموعة لا يتبع متوالية حسابية ، إنما يساوى :

$$\frac{4}{3} \pi S^3 \varepsilon^2 N$$

حيث ε هى زاوية الإسفين ، S هى رتبة الشعاع ، N هى رتبة التداخل الضوئي وتسقط
 الأشعة عمودية ، وبذلك يكون التخلف فى المسار path lag يساوى :

$$\frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{4}{3} \pi S^3 \varepsilon^2 \frac{2t}{\lambda} \right) = \frac{4}{3} S^3 \varepsilon^2 t$$

وتتطلب الحالة المثلى للحصول على هذب تداخل ضوئي - كما عيئها « تولايتسكى » -
 تتطلب استخدام مقياس تداخل ضوئي ذى فجوة صغيرة سمكها t وزاوية الإسفين صغيرة
 وتساوى ε فتصبح قيمة تخلف الطور صغيرة وتقترب من انطباق شروط تجميع ايرى .

واعتبر « تولايتسكى » أن التخلف $\frac{4}{3} S^3 \varepsilon^2$ retardation يساوى $\frac{\lambda}{2}$ (حيث : λ هى
 طول موجة الضوء) هو الحد المسموح به ليعطى الحد الأقصى لقيمة t ،

واعتبر " Barakat and Mokhtar " (١٩٦٣) أن الحد المسموح به ليعطى أعلى شدة
 ضوئية هو $\frac{\lambda}{8}$ وبذلك ينخفض الحد الأقصى لقيمة t .

والتحليل الذي قدمه « تولانسكى » - للظروف اللازمة - للحصول على هيب فيزو للتداخل الضوئى محددة الموقع باستخدام إسفين ضوئى يمكن من توسيع مجال تطبيق هذه الهيب المادة لقياس معاملات الانكسار والإتكسار المزوج للآليات .

وكما سيوضح لاحقا بالتفصيل ، فإن طريقة قياس معاملات الانكسار للآليات تقوم على وضع شعيرة بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر بزاوية صغيرة ويحصران بينهما سائلا غمرت فيه الشعيرة التى توضع فى اتجاه عمودى على حافة الإسفين الضوئى . وكما سبق أن ذكرنا ، أنه يلزم أن تكون كل من قيمة فجوة مقياس التداخل الضوئى $interferometric\ gap\ nt$ وزاوية الإسفين صغيرة لتقلل تخلف الطور $phase\ lag$ بين الأشعة المتعاقبة .

Frings of equal chromatic order : هيب قساوى الرتبة اللونية :

تم شرح التداخل الضوئى الناتج من سقوط أشعة متوازية وأحادية طول الموجة على مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر بزاوية α . ويظهر أن الهيب تقع على مستوى محدد الموقع قريب من الإسفين الضوئى يسمى سطح فايزنر Feussner .

وقد اكتشف « بروسيل Brossel » عام (١٩٤٧) وجود عدد لانهائى من المستويات المحددة المواقع $planes\ of\ localisation$ عند مسافة x من سطح فايزنر وتعطى المعادلة :

$$x = m\lambda / 2\alpha$$

وذلك فى حالة سقوط حزمة الأشعة عمودية على سطح مقياس التداخل ، حيث : λ هى طول موجة الضوء المستخدم وتأخذ m القيم ١ ، ٢ ، ٣ ، ،

ويتضح اعتماد قيمة المسافة x على طول موجة الضوء . ويتغير قيمة λ بالمقدار $d\lambda$ تنتج إزاحة فى موقع المستوى على امتداد المحور x وتساوى : $d\lambda (\frac{x}{\lambda})$

تكوين هيب تساوى الرتبة اللونية :

The formation of fringes of equal chromatic order

يكون لكل نقطة على سطح فايزنر Feussner surface سمك معين t ، ويحدث التداخل الضوئى عند النفاذ عندما تكون :

$$N\lambda = 2 t \cos \theta$$

حيث λ هى طول موجة الضوء المستخدم ، N رتبة التداخل الضوئى وتطبق نفس الشروط على طول موجة أخرى (λ_1) عند الرتبة رقم $(N + 1)$ ولموجة الضوء λ_m عند الرتبة $(N + m)$.

وينطبق هذا المفهوم فى حالة وجود الأطوال الموجية منفصلة عن بعضها أو فى حالة وجودها فى طيف مستمر continuous spectrum . وحيث إن سطح فايزنر لا يعتمد على طول موجة الضوء فإن هذه الهيب النقطية point fringes التى تنتمى إلى أطوال موجية مختلفة تقع على بعضها البعض ، ولا يمكن رؤيتها على سطح فايزنر إلا عند القيم الصغيرة جدا للرتبة N . فإذا تم إسقاط سطح فايزنر على فتحة مطياف باستخدام عدسة لالونية أو بوضع مقياس التداخل الضوئى قريبا من الفتحة ، فإن هذه الفتحة تختار خطا من هذا السطح ، ويتغير السمك t عامة لنقط هذا الخط .

وباعتبار الخط مكونا من عدد لانهاى من هذه الهيب النقطية ، فإن قوة تفريق المطياف تفصل كل مجموعة لتظهر متفرقة فى المستوى الطيفى spectral plane . وباعتبار أى نقطتين على الخط الذى تم اختياره بواسطة فتحة المطياف يقابلان السمكين t ، $t + dt$ ، فإنه ينتج لنفس رتبة التداخل الضوئى هديتان تظهران فى المستوى الطيفى عند الطولين الموجيين λ ، $\lambda + d\lambda$ حيث :

$$\frac{t}{\lambda} = (t + dt) / (\lambda + d\lambda) = \text{constant} \times N.$$

وإذا تغير السمك t بالتدريج في المدى dt ينتج منحنى مستمر لكل رتبة من رتب التداخل الضوئي . وعند التغير الرأسى فى قيمة t التى تحدث فى حالة درجات سلم ، تظهر تغيرات مفاجئة وغير مستمرة . وتظهر مجموعة هذب التداخل الضوئى اللونية فى مستوى الطيف نى رتبة التداخل الواحدة لكل مكون للمجموعة - هذه هى هذب تساوى الرتب اللونية التى اكتشفها « تولانسكى » سنة (١٩٤٥) .

شروط تكوين هذب تساوى الرتبة اللونية The condition for formation :

تقع هذب التداخل الضوئى أحادية اللون محددة الموقع على أحد مستويات بروسيل الأساسية Principal Brossel planes ، وعند استخدام ضوء أبيض وإسقاط هذه الهذب على فتحة المطياف ، تظهر هذب تداخل لونية عند المستوى الطيفى ، وتكون واضحة ومحددة المعالم فى مساحة محدودة جدا تعتمد على امتداد الموقع فى الفراغ وكذلك على البعد البؤرى للعدسة اللاونية التى تستخدم فى إسقاط الضوء على فتحة المطياف .

ونذكر « بركات Barakat » سنة (١٩٥٧) أن هذب تساوى الرتبة اللونية تتكون واضحة ومحددة المعالم فقط فى المستوى الطيفى إذا كان موقع المستوى الذى يتم تكوين الهذب عليه للنظام أحادى اللون لايعتمد على طول موجة الضوء المستخدمة ، أى لايتغير بتغير طول موجة الضوء . ويتطبق هذه النتيجة على الهذب أحادية طول الموجة المحددة على سطح فايزنر ذات الرتبة الصفرية ($m = 0$ صفر) تكون هذب تساوى الرتبة اللونية المتكونة فى المستوى الطيفى كلها واضحة ومحددة المعالم .

شكل هذب تساوى الرتبة اللونية

The shape of fringes of equal chromatic order

من الواضح الآن أن شكل الهذب الناتجة تعتمد أساسا على كيفية تغيير السمك t لنقط الخط المختار بواسطة فتحة المطياف ، وإذا اعتبرنا أن هذا الخط يمثل المحور Y فتكون t هى دالة فى y ، أى أن :

$$t = f(y)$$

ويكون المستوى الطيفي spectral plane هو المستوى (λ, y) . وتتجه هيب تساوي الرتبة اللونية مباشرة من تحويل المعادلة $t = f(y)$ من المستوى (t, y) إلى المستوى (λ, y) باستخدام :

$$N\lambda = 2nt \cos \theta$$

وذلك في حالة نفاذ الأشعة مع إهمال التغير في الطور عند الانعكاس ، ويعتمد شكل الهدف الناتجة على علاقة التحويل ، وفي حالة الهدف المتكونة من الأشعة المنعكسة حيث المعادلة هي :

$$(N + \frac{1}{2})\lambda = 2nt \cos \theta$$

وتكون الهدف المتمعة لها نفس الشكل كما في حالة نفاذ الأشعة .

ويدخل عاملان في هذا الشأن :

أ- قوة تكبير العدسة المستخدمة في إسقاط الهدف على فتحة المطياف وتكبير هذا المطياف .

ب- قوة تفرق المطياف .

ويكون تأثير تكبير العدسة على الهدف اللونية في اتجاه الفتحة وليس لها تأثير في الاتجاه العمودي أى محور λ حيث يكون التأثير لقوة تفرق الجهاز . ويمكن استخدام مطياف المنشور أو محزوز الحيود ، وفي الحالة الأولى تتبع قوة التفرق D صيغة هارتمان's formula :

$$\lambda = \lambda_0 + B / (D - D_0)$$

حيث λ_0, B, D_0 مقادير ثابتة .

بينما محزوز الحيود يعطى تفرقا خطيا linear dispersion :

$$D = K\lambda$$

وبتحديد تناول ومعالجة الحالة في إطار التفريق الخطي وبالتعويض عن λ , t بمعلومية Y, D في المعادلة الأساسية :

$$N \lambda = 2 n \cos \theta f \left(\frac{Y}{n} \right)$$

ينتج :

$$D = (2K / n) f \left(\frac{Y}{n} \right)$$

وذلك لأي هدبة عند السقوط العمودي في الهواء .

والمعادلة الأخيرة هي معادلة مجموعة من الهدب لها تكبير يتناقص عندما تأخذ N القيم ١، ٢، ٣، .. ويتضح من المعادلة السابقة أن أي هدبة في المستوى (D, Y) هي صورة مكبرة لقطاع من مقياس التداخل الضوئي تم اختياره وتحديد به بواسطة فتحة المطياف . وحيث إن تأثير التكبير غير موحد عبر المحورين Y, D فتنتج صورة مشوهة لاختلاف التكبير في أحد المحورين عنه في المحور الآخر $distorted image$ ، وكمثال على ذلك تنتج من مقطع دائري هدب على هيئة قطع ناقص . وهذا استخدام المطياف ذي المنشور ينشأ سبب آخر للتشويه وذلك نتيجة عدم انتظام التفريق $non-linearity$.

شكل هدب تساوي الرتبة اللونية المتكونة باستخدام إسفين

The shape of fringes of equal chromatic order formed by an air wedge :

إذا كانت α هي زاوية الإسفين الهوائي الذي يحصر شريحة من الهواء $air wedge$ والذي يوضع بحيث يكون أحد مكوناته موازيا لمستوى فتحة المطياف ، ε هي البعد الضوئي $optical separation$ للمسطحين الضوئيين عند نقطة لقائهما ، فنكون معادلة الجزء المختار من الإسفين بواسطة فتحة المطياف :

$$(t - \varepsilon) / y = \tan \alpha$$

هي دالة خطية في t

وبالتعويض في المعادلة الأساسية للتداخل الضوئي عند النفاذ حيث تسقط الأشعة عمودية :

$$N\lambda = 2t$$

$$N\lambda = 2 \tan \alpha y + 2 \varepsilon$$

$$Y = \cot \alpha \left(\frac{N\lambda}{2} - \varepsilon \right) \quad \text{وبذلك تكون :}$$

$$= \frac{N \cot \alpha}{2} \left(\lambda - \frac{2\varepsilon}{N} \right) \quad (6.5)$$

وتمثل المعادلة (٦-٥) مجموعة خطوط غير متوازية يمسيل كل منها بزاوية تساوى ، $\frac{N \cot \alpha}{2}$ حيث N عدد صحيح . وللمجموعة الخطوط نقطة مشتركة عند $(\theta, - \varepsilon \cot \alpha)$ ، وزيادة رقم N تقترب الهدف من الاتجاه العمودى للمحور y .

حالة حلقات نيوتن : The case of Newton's rings

توضع عدسة على مسطح ضوئى مقبى بطبقة نصف شفافة من الفضة . ويكون معادلة الدوائر فى المستوى (t, y) هى :

$$[t - (R + \varepsilon)]^2 + y^2 = R^2$$

حيث R هى نصف قطر التكرور ، ε هى البعد بين العدسة والمسطح الضوئى عند نقطة الالتقاء .

ويتم اختيار نقطة الأصل بحيث يكون :

$$t = \varepsilon \quad \text{at} \quad y = 0$$

وبتحويل المعادلة السابقة إلى المستوى (λ, y) نجد أن :

$$\left(\lambda - \frac{2(R + \varepsilon)}{N} \right)^2 + \frac{y^2}{R^2} = 1$$

وتمثل هذه المعادلة مجموعة قطع ناقصة مركزها هى $(2(R + \varepsilon)/N, 0)$ ، ويكون نصف المحور الأكبر ونصف المحور الأصغر هما $2R/N$ ، R عندما تأخذ N أرقام صحيحة وموجبة .

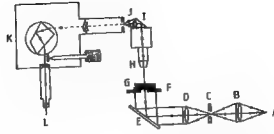
وحيث إن قيم t صغيرة بالمقارنة بـ R ، فإنه يمكن إهمال قيمة t^2 ، والمعادلة الناتجة تمثل مجموعة قطع مكافئة Parabolas ، كما توصل إلى ذلك « تولاتسكى » وتكون هذه الهدب محدبة ناحية البنفسجى .

وباستخدام عدسة مستوية - محدبة مع مسطح ضوئى بحيث يكون سطحها المحيط مركّز على هذا المسطح تكون معادلة الهدب هى :

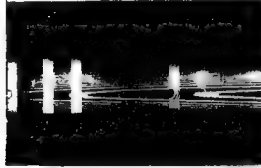
$$\left(\lambda + \frac{2(R - \epsilon)}{N} \right)^2 \left(\frac{4R^2}{N^2} \right)^{-1} + \frac{y^2}{R^2} = 1$$

حيث ϵ هى الـ sagitta للمسطح المنحنى (ذى نصف القطر R) بالنسبة للمسطح الضوئى . وهذه هى معادلة مجموعة قطع ناقصة ellipses مراكزها هى $(0, \frac{2(R-\epsilon)}{N})$ وهى تكون محدبة ناحية الأحمر . ولذلك فإنه فى حالة وجود هضبة أو ارتفاع على سطح أحد مكونات مقياس التداخل تكون هدب تساوى الرتبة اللونية محدبة تجاه البنفسجى وفى حالة وجود انخفاض أو وادى valley تكون الهدب محدبة ناحية الأحمر . والشكل رقم (٣/١) يبين النظام البصرى المستخدم لتكوين هدب تساوى الرتبة اللونية .

والشكل رقم (٤/١) يبين كيفية تكوين هدب تساوى الرتبة اللونية من هدب تساوى السمك fringes of equal thickness ، وتنتج هدب تساوى الرتبة اللونية على هيئة قطع ناقصة من مقياس تداخل ضوئى مكون من عدسة ومسطح ضوئى ، حيث تتكون مجموعة من نواثر متحدة المركز متساوية السمك . وذلك عند استخدام ضوء أحادى طول الموجة صابر من مصباح الزئبق .



شكل رقم (٣/٦) : النظام البصري المستخدم لتكوين هذب التداخل اللونية متساوية الرتبة عند النفاذ . A ، مصدر ضوئي نقطي ، B عدسة ، C فتحة دائرية ، D عدسة ، E سطح عاكس ، F قاعدة ميكروسكوب ، G مقياس التداخل الضوئي - إسفين ، H شبيثة الميكروسكوب ، I منشور قائم الزاوية ، J عدسة إسقاط ، K مطياف ، L الكاميرا (من Barakat and El-Hennawi, 1971)



شكل رقم (٤/٦) : يوضح كيفية تكون هذب التداخل اللونية ذات الرتبة الواحدة من هذب تساوى السمك

٢/٦- تطبيق هذب التداخل الضوئي المتعدد لتعيين معاملات انكسار الألياف

Application of multiple-beam Fizeau fringes to the determination of refractive indices of fibres :

قدم القسم الأول من هذا الفصل نظرية تكوين وموقع وتوزيع الشدة الضوئية لهذب فيزيو للتداخل الضوئي المتعدد وكذلك المتكونة بواسطة إسفين ضوئي Wedge وهذب تساوى الرتبة اللونية ، وسوف ندرس في هذا القسم تطبيق هذه الهذب لدراسة الألياف ، ويتضمن نظرية استخدام التداخل الضوئي لتعيين معاملات انكسار الألياف .

١/٢/٦- نظرية هيب فيزو للتداخل الضوئي لدراسة الألياف ذات المقاطع العرضية المنتظمة

Theory of Fizeau fringes applied to fibres with regular transverse sections.

اشتق « بركات Barakat » (١٩٧١) معادلات رياضية لشكل هيب فيزو للتداخل الضوئي عندما تعبر شعيرة ذات مقطع عرضي دائري ومغمورة في سائل محصور في إسفين ضوئي wedge ، واستنتج معادلات لتعيين معاملات الانكسار للألياف المتجانسة والتي تتكون من لب وقشرة ، وذلك من إزاحة الهيب داخل الشعيرة . واستنتج معادلة للألياف المتجانسة والمكونة من طبقة واحدة .

وتوضح فيما يلي المعادلات الرياضية الخاصة بمجموعة هيب فيزو للتداخل الضوئي عندما تعبر شعيرة ذات مقطع عرضي دائري ومكونة من لب وقشرة . وعند دراسة الألياف بالتداخل الضوئي توضع الشعيرة داخل الإسفين الضوئي wedge المكون من مسطحين ضوئيين مقصضين ، يميل أحدهما على الآخر ويحصران سائلا ، ويكون محور الشعيرة عموديا على حافة الإسفين edge of the wedge ، ويفرض أن أحد المسطحين الضوئيين المقصضين يلامس سطح الشعيرة . وبين الشكل رقم (١/٥) مقطع عرضي لشعيرة إسطوانية الشكل نصف قطرها r_c ، وتتكون من لب معامل انكسار مادته ونصف قطره r_c وقشرة معامل انكسار مادتها n_g ، وقد غمرت هذه الشعيرة في سائل معامل انكساره n_L يحصره إسفين ضوئي wedge ، وسقطت حزمة ضوئية ذات طول موجي λ في لاتجاه $BA \rightarrow DC$ عمودية على المسطح الضوئي السفلي وكانت زاوية الإسفين ϵ صغيرة . وتمثل t سمك فجوة مقياس التداخل الضوئي ، وقد اختير محور الشعيرة ليكون المحور Z وحافة الإسفين تكون موازية للمحور X . وفي هذا الصدد نأخذ في الاعتبار منطقتين :

أ- عندما تكون :

$$X^2 + Y^2 = r_c^2$$

حيث :

$$0 \leq x \leq r_c$$

ب- عندما تكون :

$$X^2 + Y^2 = r_f^2$$

حيث :

$$r_c \leq x \leq r_f$$

وفيما يلي اشتقاق شكل الهدب في المستوى (z, x) وهو مستوى تكون صورة هدب التداخل الضوئي plane of the interferogram ، وتعطى المعادلة الآتية طول المسار الضوئي (OPL) للشعاع \leftarrow^{BA} الذي يعبر الشعيرة في المنطقة : $0 \leq x \leq r_c$

$$OPL = (t - 2 Y_2) n_L + 2 (Y_2 - Y_1) n_s + 2 Y_1 n_c \quad (6.6)$$

والهدبة ذات الرتبة N

$$N\lambda = 2n_L t + 4 Y_2 (n_s - n_L) + 4 Y_1 (n_c - n_s) \quad (6.7)$$

حيث :

$$t = Z \tan \varepsilon$$

و ε هي زاوية الإسفين ، ويمثل مسقط حافة الإسفين نقطة الأصل للمحور Z .

ومن المعادلة رقم (٦-٧)

$$N\lambda - 2n_L t = 4 Y_2 (n_s - n_L) + 4 Y_1 (n_c - n_s)$$

$$2n_L \tan \varepsilon \left(\frac{N\lambda}{2n_L \tan \varepsilon} - Z \right) = 4 Y_2 (n_s - n_L) + 4 Y_1 (n_c - n_s) \quad (6.8)$$

وينقل نقطة الأصل إلى $(N\lambda / 2n_L \tan \varepsilon, 0)$ على المستوى (Z, X) ينتج :

$$\begin{aligned} 2n_L \tan \varepsilon \quad Z &= 4 Y_2 (n_s - n_L) + 4 Y_1 (n_c - n_s) \\ &= 4 (n_s - n_L) (r_f^2 - X^2)^{1/2} + 4 (n_c - n_s) (r_f^2 - X^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (6.9)$$

وتقيس Z إزاحة الهدبة ، ذات الرتبة N ، في الشعيرة ، اعتباراً من موقع هذه الهدبة في منطقة السائل ، ويكون اتجاه Z نحو رأس الإسفين wedge apex .

حيث :

$$n_a = n_c t_c / t_f + n_g t_g / t_f$$

وإ تطبيق هذه العلاقات عمليا تقاس $Z / \Delta Z$ ، ومعرفة t_f ، n_L يمكن حساب n_g ،
ويتعين n_g باستخدام طريقة الحد الفاصل ليك Becke-line وحساب t_g/t_f باستخدام
طريقة الفصل بالأصباغ differential staining يمكن حساب n_c .

ويتعين قيمة إزاحة الهدبة Z^{\parallel} بالنسبة إلى المسافة بين هديتين متتاليتين في منطقة
السائل ΔZ يمكن تعيين n_a^{\parallel} من المعادلة الآتية – Barakat and Hindeleh, 1964a :-

$$n_a^{\parallel} = n_L + \frac{Z^{\parallel}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{2t_f} \quad (6.13)$$

ويتعين قيمة n_a^{\perp} تطبق المعادلة :

$$n_a^{\perp} = n_L + \frac{Z^{\perp}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{2t_f} \quad (6.14)$$

وفي حالة الألياف المتجانسة التركيب يكون :

$$n_g = n_c = n$$

ويعطى العلاقة الآتية معامل الانكسار

$$\frac{Z}{\Delta Z} \frac{\lambda}{2} \approx (n - n_L) t_f \quad (6.15)$$

وفيما يلي نوضح طريقة استنتاج هذب فيزول للتداخل الضوئي عندما تعبر شعيرة
إسطوانية نصف قطرها r_f ومغمورة في سائل معامل انكساره n_L ، وكانت الشعيرة مكونة
من قشرة معامل انكسار مانتها n_g ولب معامل انكسار مانتها n_c ونصف قطره r_c .

وسنبدأ أولا باستنتاج المعادلة الرياضية لشكل الهدبة في منطقة القشرة مع ملاحظة أنها
لا تعتمد على خواص لب الشعيرة (شكل ٦/١) وبإعمال انكسار الأشعة عبر قشرة الشعيرة
وابها ويأخذ المنطقة $r_c \leq x \leq r_f$ فقط في الاعتبار ينتج :

$$N\lambda = 2n_L t + 4 Y (n_g - n_L) \quad (6.16)$$

ويلاحظ أن الرتبة في منطقة السائل تحقق المعادلة :

$$N\lambda = 2 n_L t_1$$

وينتج عن ذلك أنه في حالة $n_s > n_L$ تكون الفجوة الضوئية t_1 في مقياس التداخل الضوئي في منطقة السائل - تكون أكبر منها في منطقة القشرة التي تعطيها المعادلة رقم (١٦-٦) . وتكون إزاحة الهدبة في منطقة القشرة في حالة $n_s > n_L$ في اتجاه تناقص؛ وبذلك تأخذ المعادلة الصيغة الآتية :

$$N\lambda - 2 n_L Z \tan \varepsilon = 4 (n_s - n_L) (r_f^2 - X^2)^{1/2}$$

$$- \left(Z - \frac{N\lambda}{2n_L \tan \varepsilon} \right) = \frac{4\Delta Z}{\lambda} (n_s - n_L) (r_f^2 - X^2)^{1/2}$$

بالتحويل إلى النقطة $(N\lambda/2 n_L \tan \varepsilon, 0)$ على المستوى (Z, X)

$$- Z = \frac{4\Delta Z}{\lambda} (n_s - n_L) (r_f^2 - X^2)^{1/2} \quad (6.17)$$

Z هي إزاحة الهدبة مقاسة من نقطة على امتداد الهدبة الموجودة في منطقة السائل حيث $Z = N\Delta Z$ على المحور Z .

وتعطي المعادلة الآتية شكل الهدبة ذات الرتبة N في منطقة القشرة :

$$Z^2 \left[\left(\frac{4\Delta Z}{\lambda} \right)^2 (n_s - n_L)^2 r_f^2 \right]^{-1} + X^2 / r_f^2 = 1 \quad (6.18)$$

وهي تمثل قطعاً ناقصاً نصف محوره الأكبر ونصف محوره الأصغر هما $r_f (4\Delta Z/\lambda) (n_s - n_L)$ في المستوى (Z, X) . ويتحدد اتجاه إزاحة الهدبة Z بقيم معاملات الانكسار إما أن تكون $n_s > n_L$ أو $n_s < n_L$. ففي حالة $n_s > n_L$ تمثل الهدبة بنصف قطع ناقص في اتجاه رأس الإسفين ، بينما في حالة $n_s < n_L$ تكون إزاحة الهدبة في ناحية الهدبة الموجودة في منطقة السائل وعكس اتجاه رأس الإسفين wedge apex . ويبين الشكل (١/١٦، ب) هيب التداخل الضوئي التي تتبع معادلة قطع ناقص في حالتي $(n_s - n_L) > 0$ ، $(n_s - n_L) < 0$ على الترتيب . وعند زيادة قيمة $(n_s - n_L)$ فإن شكل الهدب تقل نصف قطع ناقص تجاه رأس الإسفين مع اطراد زيادة $(1 - \frac{1}{A^2})$ حيث :

$$A = \left(\frac{4\Delta Z}{\lambda} \right) (n_s - n_L)$$

وعند $A = 1$ تأخذ الهدبة شكل نصف دائرة ، وعند استمرار نقصان قيمة $(n_s - n_L)$ فإن نصف المحور الأكبر للقطع الناقص يصبح نصف محور الأصغر .

وعندما تكون $(n_s = n_L)$ تأخذ الهدبة شكل الخط المستقيم في منطقة القشرة أى تكون على امتداد الهدبة الموجودة في منطقة السائل . وعند استمرار زيادة قيمة n_L تصبح الهدبة على شكل قطع ناقص ولكن من الناحية الأخرى للهدبة الموجودة في منطقة السائل أى في مكن اتجاه رأس الأسفين الضوئى .

وفي حالة شعيرة إسطوانية تتكون من قشرة ولب مغمورة في سائل معامل انكساره n_L يساوى معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة n_s ، وكان معامل انكسار مادة لب الشعيرة ثابتا ، فإن شكل هدب فيزى للتداخل الضوئى المتعدد خلال منطقة لب الشعيرة في المستوى (z, x) تعطيه المعادلة :

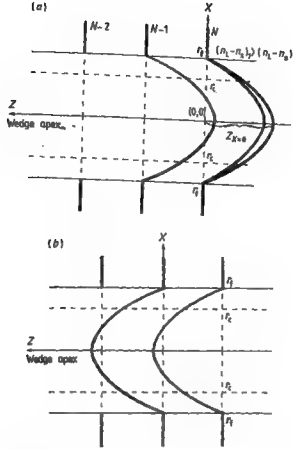
$$Z^2 \left[\left(\frac{4\Delta Z}{\lambda} \right)^4 (n_c - n_L)^2 r_c^2 \right]^{-1} + X^2 / r_c^2 = 1 \quad (6.19)$$

ويكون نصف المحور الأكبر ونصف المحور الأصغر هما r_c و Br_c على الترتيب .

$$B = \left(\frac{4\Delta Z}{\lambda} \right) (n_c - n_L) \quad \text{حيث :}$$

والقد سبق دراسة تأثير قيمة $(n_s - n_L)$ في منطقة القشرة ، ويوجد تأثير مماثل المقدار $(n_c - n_L)$ في المنطقة $0 \leq x \leq r_c$ على شكل الهدب ، وذلك في حالة شعيرة مغمورة في سائل له نفس معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة .

ويمكن ملاحظة تأثير تغير زاوية الإسفين الضوئى ε على شكل الهدب من قيم نصف المحور الأكبر ونصف المحور الأصغر وهما $\varepsilon / n_L \tan r_c / (n_c - n_L) 2$ على الترتيب . وعندما تقل الزاوية ε فإن نصف المحور الأكبر يزداد وكذلك تزيد قيمة ΔZ ، ونحصل على تأثير مماثل عندما تقل قيمة n_L .



شكل رقم (١/٦) : يوضح شكل هذب التداخل الضوئي عند (a) $(n_g - n_L) > \text{صفرا}$ ،
(b) $(n_g - n_L) < \text{صفرا}$.

بعنا نفترض أنه توجد مجموعة من هذب التداخل الضوئي ذات الرتب $N+2, N+1, N$ كما في الشكل رقم (١/٧) ويقاس مواقع نقط الأصل للهذب :

$$O_N \equiv \left(\frac{N\lambda}{2n_L \tan \varepsilon}, 0 \right)$$

$$O_{N+1} \equiv [(N+1) \Delta Z, 0]$$

$$O_{N+2} \equiv [(N+2) \Delta Z, 0]$$

من رأس الإسفين الضوئي .

ويبدل هذا على أن مجموعة الهذب وشكلها وموقعها تقدم طريقة مسح للكشف عن أي عيوب أو اختلافات في المقطع العرضي على طول الشعيرة ، ويمكن إجراء مسح بين مواقع

هدبتين بتغير زاوية الإسفين ، إذ يتم تحريك الهدبة لتغطي هذه المسافة وتوفر أية معلومات تظهرها عن اختلافات في مقطع الشعيرة ، وتتكون الهدبة النقطية عند الحد الفاصل بين السائل والقشرة نتيجة الضعاع المماس لسطح الشعيرة الإسطوانية في الحالة الأولى ، أما في حالة المضاهاة فالهدبة النقطية تكون نتيجة لضعاع المماس لسطح لب الشعيرة . فانمكاسة السطح الفاصل تكون عالية للغاية عند زوايا سقوط قريبة من $\frac{\pi}{2}$ ، وبالتالي تكون الشدة الضوئية النفاذة ضئيلة للغاية لجميع قيم $(n_s - n_L)$ أو $(n_c - n_L)$ عند المضاهاة .

وينتج عن ذلك نقصان حاد في الشدة الضوئية للهدبة يظهر لانقطاعه عند النقطة التي تحدد السطح الفاصل .

وتمطى المعادلة الآتية شكل هذب التداخل الضوئي المتعدد ذي الرتبة N خلال شعيرة مكونة من قشرة ولاب :

$$Z = \frac{4\Delta Z}{\lambda} (n_s - n_L) (r_f^2 - X^2)^{1/2} + \frac{4\Delta Z}{\lambda} (n_c - n_s) (r_c^2 - X^2)^{1/2} \quad (6.20)$$

وتقاس إزاحة الهدبة من النقطة $(N Z, 0)$ تجاه رأس الإسفين الضوئي :

$$Z = f_1(X) + f_2(X)$$

والمعادلة التي تعطى شكل الدالة $Z = f_1(X)$ هي :

$$(Z^2 / A^2 r_f^2) + (X^2 / r_f^2) = 1 \quad (6.21)$$

$$A = \frac{4\Delta Z}{\lambda} (n_s - n_L) \quad \text{حيث :}$$

بينما شكل الدالة $Z = f_2(X)$ فيعطى من المعادلة :

$$(Z^2 / B^2 r_c^2) + (X^2 / r_c^2) = 1 \quad (6.22)$$

$$B = \frac{4\Delta Z}{\lambda} (n_c - n_s) \quad \text{حيث :}$$

ويمثل إسهام الدالتين $f_1(X)$ ، $f_2(X)$ في تكوين الهدبة عبر الشعيرة بيانيا ثم يتم جمع الإسهامين عنهما تكون $n_c > n_s > n_L$ ، ويكون نصف القطعتين الناقصين على جانب واحد من الهدبة في منطقة السائل وفي اتجاه رأس الإسفين .

أما في حالة $n_L > n_s, n_c > n_s$ فإن :

$$Z = f_2(x) - f_1(x)$$

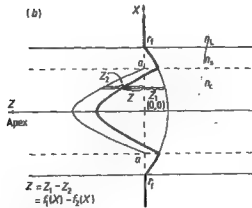
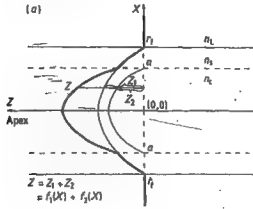
ويمثل الشكل رقم (١/٧/ب) شكل الهدبة عبر لب وقشرة في المائتين المذكورين .

ومن الشكل رقم (١/٧/ب) تعطى المعادلة الآتية قيمة الإزاحة Z عند $x = 0$:

$$Z_{x=0} = \frac{4 \Delta Z}{\lambda} [(n_s - n_L) r_f + (n_c - n_s) r_c] \quad (6.23)$$

ومن الشكل (١/٧/ب)

$$Z_{x=0} = \frac{4 \Delta Z}{\lambda} [(n_c - n_s) r_c - (n_L - n_s) r_f] \quad (6.24)$$



شكل رقم (١/٧) : يوضح شكل هذب التداخل عبر لب وقشرة في حالة

$n_s > n_c, n_s > n_L$ (b), $n_s < n_c, n_L < n_s$ (a)

٢/٢/٦- الألياف منتظمة المقطع العرضي متعددة الطبقات

Multilayer fibres with regular transverse sections :

تم الحصول على المعادلة الرياضية لشكل هيب فيزو للتداخل الضوئي المتعدد عندما تعبر شعيرة إسطوانية متعددة الطبقات ، وذلك بإضافة حدود مناسبة لمعادلة فرق المسار الضوئي (OPL) المعطاة بالمعادلة رقم (٦-٦) ، وتمثل هذه الحدود إسهامات كل طبقة من الطبقات المكونة للشعيرة ، وتنتج المعادلة الآتية :

$$\left(\frac{Z}{\Delta Z}\right)_x \frac{\lambda}{2} = 2 \left(\sum_{k=1}^m n_k r_k - \sum_{k=1}^{m-1} n_k r_{k+1} - n_L r_1 \right) \quad (6.25)$$

حيث n_k تمثل معامل انكسار الطبقة k ، وكذلك فإن :

$$K = 1, 2, \dots, m$$

و r_k هو نصف قطر هذه الطبقة ، n_L هو معامل انكسار سائل الغمر ، r_1 هو نصف قطر الطبقة الخارجية للشعيرة . وقد حصل كل من "El-Nicklawy and Fouda" (١٩٨٠) و "Hamza and Kabeei" (١٩٨٦) على هذه المعادلة ، وعالج الأخيران مشكلة وجود عدم انتظام في المقطع العرضي للشعيرة .

واستنتج "El-Hennawi" (١٩٨٨ a,b,c) معادلة لشكل هيب فيزو للتداخل الضوئي التي تعبر شعيرة إسطوانية مكونة من طبقة واحدة وطبقتين ومتعددة الطبقات ، أخذاً في الاعتبار انكسار الشعاع الضوئي داخل الشعيرة ، وتكون المعادلة في حالة الشعيرة متعددة الطبقات هي :

$$\left(\frac{Z}{\Delta Z}\right)_x \frac{\lambda}{2} = 2 \left(\sum_{k=1}^m (n_k^2 r_k^2 - n_L^2 X^2)^{1/2} - \sum_{k=1}^{m-1} (n_k^2 r_{k+1}^2 - n_L^2 X^2)^{1/2} - n_L (r_1^2 - X^2)^{1/2} \right) \quad (6.26)$$

حيث m هي عدد الطبقات المكونة للمقطع العرضي للشعيرة . وعند $x = 0$ لا يوجد انكسار وتؤول المعادلة رقم (٦-٦) إلى المعادلة رقم (٦-٢٥) .

٢/٢/٦- تطبيق هوب فيزو للتداخل الضوئي على الألياف ذات المقاطع العرضية غير المنتظمة

Multiple-beam Fizeau fringes applied to fibres with irregular transverse-sections:

أولاً : الألياف المتجانسة التركيب (Hamza et al., 1985a)
Homogeneous fibres :

شرح "Simmens" (١٩٥٨) طريقة باستخدام جهاز بابينيت Babinet compensator لتعيين معامل الانكسار المزوج للأجسام التي لها وزن ثابت بالنسبة لوحدة الأطوال ، ولكن لها مقطع عرضي غير منتظم الشكل . ولتعيين معاملات الانكسار والانكسار المزوج للألياف ذات المقاطع العرضية غير المنتظمة قدم "Hamza" (١٩٨٠) طريقة باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي والميكروسكوب الإلكتروني الماسح . وفيما يلي شرح لتطبيق هوب فيزو للتداخل الضوئي المتعدد لدراسة الألياف المتجانسة التركيب والتي لها مقطع عرضي غير منتظم .

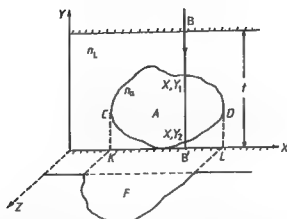
ويبين الشكل رقم (٨/٦) شعيرة غير منتظمة المقطع العرضي موضوعة في إسفين ضوئي مكون من مسطحين ضوئيين مفضلضين ، يميل أحدهما على الآخر ، ويحصران بينهما سائلا غمرت فيه الشعيرة ، وتعطى المعادلة الآتية مساحة مقطع الشعيرة A في المستوى (X,Y) :

$$A = \int_k^L (Y_1 - Y_2) dX \quad (6.27)$$

حيث : Y_1, Y_2 هما نقطتا تقاطع لخط الماسح scanning line ، والذي يوازي المحور Y مع محيط مقطع الشعيرة . ويقع هذا الخط بين النقطتين C, D اللتين تقابلان النقطتين K, L على المحور X .

BB' → وتعطى المعادلة الآتية طول المسار الضوئي OPL للشعاع

$$OPL = [t - (Y_1 - Y_2)] n_L + (Y_1 - Y_2) n_s \quad (6.28)$$



شكل رقم (٨/٦) : يوضح شعيرة غير منتظمة المقطع العرضي شملت في إسفين شموثي مفضض يحصر سائلا تمثل A مساحة مقطع الشعيرة ، n_L معامل انكسار سائل الغمر (من Hamza et al., 1985 a)

وبالنسبة للهدبة ذات رتبة التداخل N يمكن كتابة المعادلة :

$$N\lambda = 2n_L t + 2(n_a - n_L)(Y_1 - Y_2) \quad (6.29)$$

وبالتعويض عن t بالمقدار :

$$t = Z \tan \epsilon$$

ويتحول نقطة الأصل للنقطة $(N\lambda/2 n_L \tan \epsilon, o)$ على المستوى (Z, X) نحصل على :

$$n_L \tan \epsilon Z = (n_a - n_L)(Y_1 - Y_2) \quad (6.30)$$

حيث Z هي القيمة الجديدة بعد نقل الأصل ، وهي تقيس إزاحة الهدبة ذات الرتبة رقم N في منطقة الشعيرة عنها في منطقة السائل .

وبإجراء التكامل ليشمل المنطقة $L \geq X \geq K$ تنتج المساحة F المحصورة تحت إزاحة

هدب الشعيرة :

$$\int_K^L (Y_1 - Y_2) dx = \frac{n_L \tan \epsilon}{n_a - n_L} \int_K^L Z dx \quad (6.31)$$

$$\int_K^L Z dx = F \text{ and } A = \frac{n_L \tan \epsilon}{n_a - n_L} F \quad \text{وبفرض أن :}$$

ينتج :

$$n_a - n_L = \frac{F}{2A} \frac{\lambda}{\Delta Z} \quad (6.32)$$

وفي حالة ضوء مستقطب في اتجاه عمودي على محور الشعيرة :

$$n_a^{\parallel} = n_L + \frac{F^{\parallel}}{2A} \frac{\lambda}{\Delta Z} \quad (6.33)$$

وفي حالة ضوء مستقطب في اتجاه مواز لمحور الشعيرة :

$$n_a^{\perp} = n_L + \frac{F^{\perp}}{2A} \frac{\lambda}{\Delta Z}$$

وبذلك يمكن حساب معاملات الانكسار n_a^{\parallel} , n_a^{\perp} من قياس قيم A , F .

ويانسية لمعامل الانكسار المزوج Δn_a فيعطى بالمعادلة :

$$\Delta n_a = \frac{F^{\parallel} - F^{\perp}}{A} \frac{\lambda}{2\Delta Z} \quad (6.34)$$

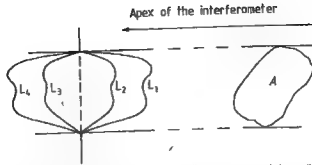
ويوضح الشكل رقم (٩/٦) سلوك الهبة عند استخدام سوائل غمر لها معاملات انكسار مختلفة ويستخدم سائلا غمر مختلفان ولهما معاملى انكسار n_{L1} , n_{L2} (عند نفس درجة الحرارة) وذلك للاستغناء عن قياس مساحة مقطع الشعيرة (١٩٨٦، Hamza et al. - ويمكن باستخدام المعادلتين الآتيتين تعيين معامل الانكسار المتوسط للشعيرة n_a :

$$\frac{F_1}{2A} \frac{\lambda}{\Delta Z_1} = n_a - n_{L1} \quad (6.35)$$

and

$$\frac{F_2}{2A} \frac{\lambda}{\Delta Z_2} = n_a - n_{L2} \quad (6.36)$$

حيث F_2 , F_1 هما المساحتان المحصورتان تحت إزاحتى الهدفتين والمسافة بين كل هدفيتين متتاليتين في حالتى المعادلتين (٦-٣٥) ، (٦-٣٦) هما ΔZ_2 ، ΔZ_1 على الترتيب .



شكل رقم (٩/٦) : يمثل سلوك هيب فنيئو للتداخل الضوئي عند استخدام أربعة سوائل غير مختلفة لها معاملات انكسار $n_{L4}, n_{L3}, n_{L2}, n_{L1}$ وقيم هذه المعاملات بالمقارنة بقيمة معامل انكسار مادة الشعيرة n_a هي $n_{L4} > n_{L3} > n_a, n_a < n_{L2} < n_{L1}$ (من (Hamza et al., 1985 a

الآليات غير المتجانسة التركيب والمكونة من قشرة وب

(Hamza et al., 1985b)

Homogeneous fibres with skin/core structure :

يبين الشكل رقم (١٠/٦) مقطعا عرضيا لشعيرة ذات لب غير منتظم المقطع العرضي محاط بقشرة غير منتظمة المقطع العرضي أيضا . وتعطى المعادلة الآتية مساحة المقطع العرضي A للشعيرة في المستوى (X, Y) :

$$A = \int_M^S (Y_1 - Y_2) dX \quad (6.37)$$

وتعطى مساحة المقطع العرضي لللب الشعيرة في المستوى (X, Y) من المعادلة :

$$B = \int_P^Q (Y_3 - Y_4) dX$$

وتعطى المعادلة الآتية طول المسار الضوئي (OPL) للشعاع DD :

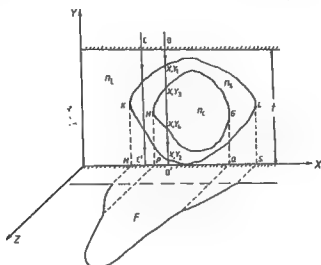
$$OPL = [t - (Y_1 - Y_2)] n_L + [(Y_1 - Y_2) - (Y_3 - Y_4)] n_s + (Y_3 - Y_4) n_c \quad (6.38)$$

وبالنسبة للهبة ذات رتبة التداخل N يمكن كتابة المعادلة :

$$N\lambda = 2n_L t + 2(n_s - n_L)(Y_1 - Y_2) + 2(Y_3 - Y_4)(n_c - n_s) \quad (6.39)$$

وبتحويل نقطة الأصل إلى النقطة $(N\lambda/2n_L \tan \varepsilon, 0)$ على المستوى (Z, X) ينتج :

$$n_L \tan \varepsilon Z = (n_s - n_L) (Y_1 - Y_2) + (n_c - n_s) (Y_3 - Y_4)$$



شكل رقم (١٠/٦) : يمثل شعيرة غير منتظمة المقطع العرضي لها لب محاط بقشرة ومغمورة في إسفين مقلض يحصر سائلا . ويمثل F المساحة المحصورة تحت إزاحة الهدبة (من Hamza et al., 1985 a)

وبإجراء التكامل للمعادلة السابقة يشمل المنطقة $M \geq X \geq S$ تنتج المساحة المحصورة تحت إزاحة الهدبة :

$$n_L \tan \varepsilon \int_M^S Z dX = (n_s - n_L) \int_M^S (Y_1 - Y_2) dX + (n_c - n_s) \int_P^Q (Y_3 - Y_4) dX \quad (6.40)$$

$$\int_M^S Z dX = F \quad \text{حيث :}$$

$$F n_L \tan \varepsilon = (n_s - n_L) A + (n_c - n_s) B \quad \text{وتكون :}$$

$$\frac{\lambda}{2 \Delta Z} F = (n_s - n_L) A + (n_c - n_s) B$$

ويعطى معامل انكسار مادة الشعيرة باستخدام ضوئ مستقطب فى اتجاه محور الشعيرة
من المعادلة :

$$\frac{\lambda}{2 \Delta Z} F^{\parallel} = (n_s^{\parallel} - n_L) A + (n_c^{\parallel} - n_s^{\parallel}) B \quad (6.41)$$

وفى حالة استخدام ضوئ مستقطب فى اتجاه عمودى على محور الشعيرة تصبح المعادلة

$$\frac{\lambda}{2 \Delta Z} F^{\perp} = (n_s^{\perp} - n_L) A + (n_c^{\perp} - n_s^{\perp}) B$$

وينتج معامل الانكسار المزدوج Δn_c للب الشعيرة من المعادلة :

$$\Delta n_c = B^{-1} \left(\frac{\lambda}{2 \Delta Z} (F^{\parallel} - F^{\perp}) - \Delta n_s (A - B) \right) \quad (6.42)$$

ويمكن استنتاج معامل الانكسار المتوسط لمادة الشعيرة n_a بوضع :

$$n_g = n_c = n_a$$

حالة الألياف متعددة الطبقات (Hamza and Kabeel, 1986)

Multi-layer fibres :

يوضح الشكل رقم (١١/٦) مقطعا عرضيا فى شعيرة إسطوانية متعددة الطبقات
موضوعة فى إسفين ضوئى وتحتوى الشعيرة على عدة طبقات عددا m ذات معاملات
انكسار $n_m, \dots, n_3, n_2, n_1$

حيث n_1 هو معامل انكسار الطبقة الخارجية ، وكذلك فإن $n_m = n_c$

وتمثل أنصاف أقطار الطبقات المختلفة بالمعادلة :

$$r_Q = (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}, \quad Q = 1, 2, \dots, m$$

وتعطى المعادلة الآتية طول المسار الضوئى (OPL) للشعاع \xrightarrow{EE} :

$$\begin{aligned} OPL = & (t - 2Y_1) n_L + 2 (Y_1 - Y_2) n_1 \\ & + 2 (Y_2 - Y_3) n_2 + \dots + 2 (Y_{m-1} - Y_m) n_{m-1} + 2 Y_m n_m \end{aligned} \quad (6.43)$$

ومن المعادلة الأساسية للتداخل نجد أن :

$$N\lambda - 2n_L Z \tan \varepsilon = 4 \sum_{Q=1}^m (n_Q - n_{Q-1}) Y_Q \quad (6.44)$$

وبتحويل نقطة الأصل إلى $(N\lambda / 2n_L \tan \varepsilon, 0)$ على المستوى (Z, X) ينتج أن :

$$n_L \tan \varepsilon Z = 2 \sum_{Q=1}^m (n_Q - n_{Q-1}) Y_Q$$

وتمثل Z القيمة الجديدة لإزاحة الهدبة ، يكون اتجاهها نحو رأس الأسفين .

وتمثل المعادلة الآتية هذب فيزو للتداخل الضوئي على المستوى (Z, X) :

$$\frac{\lambda}{4\Delta Z} Z = \sum_{Q=1}^m (n_Q - n_{Q-1}) (r_Q^2 - X^2)^{1/2} \quad (6.45)$$

حيث تعرف قيمة X بعدد الطبقات .

ولتلافى مشكلة وجود عدم الانتظام في مقطع الشعيرة ، تمثل المساحة المحصورة تحت

إزاحة الهدبة ، وعندما تعبر الشعيرة عمودية على محورها تمثل تكامل فرق المسار الضوئي

عبر هذه الشعيرة (Simmons, ١٩٥٨) ويرتبط جزء المساحة F_m المحصور تحت إزاحة

الهدبة في المستوى (Z, X) في حالة شعيرة متعددة الطبقات وفي المنطقة المحيطة

بـ $\alpha \leq X \leq \beta$ بالأجزاء $A_{Q,m}$ من مساحات مقاطع الطبقات المختلفة بالمعادلة :

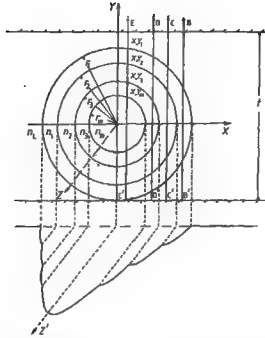
$$\frac{\lambda}{4\Delta Z} F_m = \sum_{Q=1}^m (n_Q - n_{Q-1}) A_{Q,m} \quad (6.46)$$

$$F_m = \int_{\alpha}^{\beta} Z dx \quad \text{حيث :}$$

$$A_{Q,m} = \int_{\alpha}^{\beta} (r_Q^2 - X^2)^{1/2} dX$$

β, α هما نقطتان يتم اختيارهما على المحور X لخريطة هذب التداخل

الضوئي . interferogram .



شكل رقم (١١/١) : مقطع عرضي لشعيرة إسطوانية متعددة الطبقات غمرت في إسفين ملفض يحصر سائلا . وموضح شكل هذب التداخل الضوئي عبر كل طبقة من طبقات الشعيرة (من Hamza and Kabeel 1986)

٣/٦- الألياف البصرية بنوعها GRIN, STEP

Optical fibres : Step-index and graded index :

١-٣/٦- تطبيق هذب التداخل الضوئي المتمدد على الألياف البصرية STEP لتعيين مواصفاتها وخصائصها

Multiple-beam interference fringes applied to step-index optical fibres to determine fibre characteristics:

تستخدم الألياف البصرية بنوعها GRIN, STEP-index كموجهات للموجات الضوئية في نظم التراسل الضوئي ، وهي ألياف إسطوانية الشكل نصف قطرها r_c تتكون من قشرة clad معامل انكسار مادتها n_{clad} ولب معامل انكسار مادته n_{core} ونصف قطرها $r_c = a$ ، ودائما تكون $n_{core} > n_{clad}$.

وفي حالة الألياف البصرية STEP-index يكون معاملا انكسار طبقتها n_{core}, n_{clad}

ثابتى القيمة . وهى إما أن تكون وحيدة المنوال monomode أو عديدة المنوال multimode ، والفرق بينهما يكون فى أبعاد لب وقشرة الشعيرة .

وفى حالة الألياف البصرية STEP-index وحيدة المنوال نجد أن $2r_c \approx 10 \mu m$ أو أقل ، بينما $2r_f = 125 \mu m$ ، وفى الشعيرة من الألياف GRIN عديدة المنوال تكون $2r_f = 125 \mu m$ ، $2r_c \approx 80 \mu m$.

وفى جميع أنواع الألياف البصرية المستخدمة كموجهات للموجات تكون قيمة معامل انكسار مادة قشرتها n_{clad} ثابتة ، بينما تكون قيمة معامل انكسار لبها n_{core} ثابتة فقط فى حالة الألياف من نوع STEP-index ؛ وفى حالة الألياف من نوع GRIN نجد أن معامل انكسار لبها يقل مع البعد عن مركز الشعيرة ويتبع قانون أسى power law .

ويتطبيق هذب فيزيو للتداخل الضوئى على شعيرة من نوع STEP-index المغمورة فى سائل موصوع بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر ، تكون المعادلة التى تعطى إزاحة الهبة Z والمقاسة من النقطة (NAZ, O) تجاه رأس الإسفين الضوئى هى المعادلة رقم (٦-٢٠) - كما تم استنتاجها سابقا :

$$Z = \frac{4\Delta Z}{\lambda} (n_{clad} - n_L) (r_f^2 - X^2)^{1/2} + \frac{4\Delta Z}{\lambda} (n_{core} - n_{clad}) (r_c^2 - X^2)^{1/2}$$

$$= f_1(X) + f_2(X)$$

ويعطى شكل الدالة $Z = f_1(X)$ من المعادلة رقم (٦-٢١) التى تصف قطعاً ناقصاً نصف محوره الأكبر ونصف محوره الأصغر هما Ar_f ، r_f حيث :

$$A = 4 \Delta Z (n_{clad} - n_L) / \lambda$$

بينما القطع الناقص الذى تمثله الدالة $f_2(X)$ تكون أطوال نصف محوره الأكبر ونصف محوره الأصغر هى Br_c ، r_c حيث :

$$B = 4 \Delta Z (n_{core} - n_{clad}) / \lambda$$

وذلك يتفق مع المعادلة رقم (٦-٢٢) .

وقد سبق أن شرحنا طريقة إضافة إسهامات الدالتين - كما ظهر ذلك فى الشكل رقم (٧/٦) .

استنتاج بروفيل معامل انكسار شعيرة بصيرية (STEP-index) من
إزاحة هيب التداخل الضوئي :

Deduction of the index profile of a step - index optical fibre from the fringe shift :

نحصل من المعادلة (٦-٢١) على شكل هيب فيزي للتداخل الضوئي عندما تعبر شعيرة
إسطوانية فى منطقة قشرتها $r_c \leq X \leq r_f$. وتكون معادلة المماس للقطع الناقص عند أى
نقطة (Z', X') هي :

$$\frac{ZZ'}{A^2} + \frac{XX'}{r_f^2} = 1$$

ويكون ميل الخط المستقيم هو :

$$\frac{dX}{dZ} = - \frac{Z'}{X'} \frac{1}{A^2}$$

وينتج عن ذلك :

$$\frac{dX}{dZ} \frac{X'}{Z'} = - \left[\lambda^2 / 16 (\Delta Z)^2 (n_{clad} - n_L)^2 \right]$$

= constant for the fringe system.

وهذا هو البارامتر الذى يوضح ثبوت قيمة معامل الانكسار الذى يميز شعيرة ال-STEP
index .

وباعتبار أن :

$$n_{clad} - n_L = \lambda / 4\Delta Z \left| \frac{dX}{dZ} \frac{X'}{Z'} \right|^{1/2} \quad r_c \leq X \leq r_f$$

والمنطقة لب الشعيرة وباستخدام سائل له معامل انكسار n_L يساوى معامل انكسار مادة
قشرة الشعيرة n_{clad} يكون :

$$n_{core} - n_L = \lambda / 4\Delta Z \left| \frac{dX}{dZ} \frac{X'}{Z'} \right|^{1/2} \quad 0 \leq X \leq r_c$$

ويوضح الشكل رقم (١٢/١) بروفيل معامل الانكسار $(n_{clad} - n_L)$ فى المنطقة
 $r_c \leq X \leq r_f$ و بروفيل معامل الانكسار $(n_{core} - n_L)$ فى المنطقة $0 \leq X \leq r_c$ وذلك فى
حالة $n_L = n_{clad}$

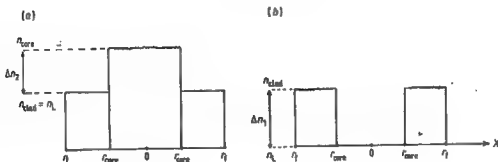
وفى الحالة العامة التى يغير فيها شعيرة من نوع step-index فى سائل يحصره إسفين مفضض سطحية وكانت $n_{\text{clad}} \neq n_L$ أى حالة لامضاهاة ، فإنه يمكن استنتاج بروفيل معامل الانكسار فى منطقة لب الشعيرة من شكل الهدب التى نحصل عليها عمليا وذلك بطرح الإسهام الرياضى لطبقة القشرة فى منطقة اللب من قيم الإزاحة Z عند جميع النقاط على الهدبة لجميع قيم X فى حالة $n_C \geq n_{\text{clad}} \geq n_L$ ، وفى الحالة الثانية التى تكون فيها $n_L > n_{\text{clad}}$ ، فإن قيم إضافة Z_1 إلى Z من منحى الهدبة الذى نحصل عليه عمليا يعطى Z_2 لجميع قيم X ... ونحصل على الإسهام الرياضى لمنطقة القشرة بإكمال القطع الناقص الذى يبدأ جزأه فى منطقة القشرة ليقطى منطقة اللب .

$$r = r_C, -a \leq X \leq a \quad \text{فى منطقة اللب حيث} \quad (dX/dZ) (X'/Z')^{1/2}$$

فإننا نحصل على قيم $(n_{\text{core}} - n_{\text{clad}})$ لجميع قيم X ومن ثم بروفيل معامل الانكسار .

وفى منطقة القشرة حيث : $r_C \leq X \leq r_f$ فإن قيم Z مقاسة من $Z = 0$ تعطى :

$$\left| \frac{dX}{dZ} \frac{X'}{Z'} \right|^{1/2} \frac{\lambda}{4\Delta Z} \quad \text{من العلاقة} \quad (n_{\text{clad}} - n_L)$$



شكل رقم (١٢/٦) : بروفيل معامل الانكسار

أ- حالة سائل الغمر له معامل انكسار مساو لمعامل انكسار القشرة

ب- ثبات قيمة معامل انكسار القشرة n_{clad} على مدى مسكها

٢/٣/٦- نظرية هيب التداخل الضوئي المتعدد عند تطبيقها على الألياف البصرية متدرجة معامل انكسار لها GRIN

The theory of multiple-bam Fizeau fringes applied to graded-index optical fibres:

طبق "Marhic et al" (١٩٧٥) طريقة التداخل الضوئي الثنائي على الألياف البصرية بفهر الشعيرة في سائل معامل انكساره يساوى معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة وإضافتها بأشعة عمودية على محورها ، وتم في هذه الدراسة الحصول على تعبير تحليلي مبسط لفرق المسار الضوئي للألياف ذات بروفيل معامل انكسار لها يزداد من بداية لب شعيرة حتى منتصفها مع مربع البعد عن المركز .

وطبق "Saunders & Gardner" (١٩٧٧) طريقة Marhic على الألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار . وفي هذه الحالة تصيب قيمة Δn من القيمة العظمى لإزاحة الهدبة وحسب قيمة α من أى نقطة على الهدبة باستخدام الحاسب العلمى .

وفيما يلى نوضح المعادلات الرياضية لمجموعة هيب فيزو التى تعبر شعيرة من الألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار - Barakat et al, ١٩٨٥ - وافترض فى هذه المعالجة أن الشعيرة ذات مقطع عرضى مستدير تماما وله لب محاط بقشرة وفهرت الشعيرة فى سائل موضوع بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر ، بحيث يكون محورها عموديا على حافة الإسفين الضوئى .

واعتبر أن سطح الشعيرة يمس السطح المفضض المسطح الضوئى السفلى ، والشكل رقم (١٣/٦) يمثل مقطعا عرضيا لشعيرة إسطوانية متدرجة معامل الانكسار GRIN ونصف قطرها r_f وتتكون من لب معامل انكسار مائته متدرج ويساوى $n(r)$ ونصف قطره r_c وقشرة معامل انكسار مادتها ثابت ومقداره n_{clad}

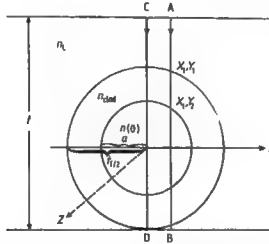
$$n(r) = n(0) [1 - 2\Delta (r/a)^\alpha]^{1/2} \quad 0 \leq r \leq a \quad (6.47)$$

حيث r هى المسافة مقاسة من مركز الشعيرة ، a هو نصف قطر لب الشعيرة
: Gloge and Marcatili (١٩٧٣)

$$\Delta = (n^2(o) - n^2(a)) / (2 n^2(o))$$

و α هو البارامتر الذى يحدد شكل البروفيل ، وتغير الشعيرة متدرجة معامل الانكسار فى السائل المحصور بين المسطحين الضوئيين المفضضين المكونين للإسفنج الضوئى ودرجة استوائهما هي $\pm \lambda/50$ ، وكانت قيمة معامل انكسار السائل n_L مقارنة لقيمة معامل انكسار قشرة الشعيرة n_{clad} . وسقطت حزمة متوازية \rightarrow^{AB} ; \rightarrow^{CD} من الأشعة ذات الطول الموجى λ عمودية على المسطح الضوئى الأسفل ، واختيرت زاوية الإسفنج الضوئى E بحيث تكون صغيرة وتبقى بشروط تكوين هيب التداخل الضوئى المتعدد .

وكان محور الشعيرة فى اتجاه المحور Z وحافة الإسفنج الضوئى توازى المحور X وكان سمك الفجوة الضوئية هو t .



شكل رقم (١٢/٦) : مقطع عرضى لقياس التداخل الذى يحصر سائل القمر وقد غمس فيه شعيرة متدرجة معامل انكسار لها $n(r)$

والمعادلة الآتية تعطى فرق المسار الضوئى (OPL) للشعاع \rightarrow^{AB} :

$$OPL = (t - 2y_2) n_L + 2(y_2 - y_1) n_{clad} + 2 \int_0^{y_1} \sqrt{a^2 - x_1^2} \frac{1}{2} n(x) dy \quad (6.48)$$

وتعرف $n(x)$ من المعادلة رقم (٤٧-٦) . وفى حالة $\Delta \ll 1$ كما هو الحال فى الألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار تكون :

$$n(r) = n(0) - \Delta n (r/a)^\alpha$$

حيث :

$$\Delta n = (n(0) - n(a))$$

وينتج أن :

$$\begin{aligned} OPL = & (t - 2y_2) n_L + 2(y_2 - y_1) n_{clad} + 2n(0) (a^2 - X_1^2)^{1/2} \\ & - 2 \frac{\Delta n}{a^\alpha} \int_0^{(a^2 - x_1^2)^{1/2}} (X_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy \end{aligned} \quad (6.49)$$

وبالنسبة للهبة ذات رتبة القداخل N :

$$\begin{aligned} N\lambda = 2(OPL) = 2n_L t + 4y_2 (n_{clad} - n_L) + 4\Delta n y_1 \\ - \frac{4\Delta n}{a^\alpha} \int_0^{(a^2 - x_1^2)^{1/2}} (X_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy \end{aligned} \quad (6.50)$$

Now $t = z \tan \varepsilon$ ($z = 0$ at $t = 0$) so

$$\begin{aligned} N\lambda - 2n_L z \tan \varepsilon = 4y_2 (n_{clad} - n_L) + 4\Delta n y_1 \\ - \frac{4\Delta n}{a^\alpha} \int_0^{(a^2 - x_1^2)^{1/2}} (X_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy \end{aligned} \quad (6.51)$$

وبالتحويل إلى النقطة $(O, N\lambda/2n_L \tan \varepsilon)$ ينتج :

$$z 2n_L \tan \varepsilon = 4y_2 (n_{clad} - n_L) + 4\Delta n y_1 - 4 \frac{\Delta n}{a^\alpha} \int_0^{(a^2 - x_1^2)^{1/2}} (x_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy \quad (6.52)$$

Δz هي المسافة بين كل هبتين متتاليتين في منطقة السائل وتساوى $\lambda/2n_L \tan \varepsilon$

فإذا كانت Δz هي مقدار إزاحة الهبة ذات الرتبة N في الشعيرة عن موقعها في منطقة

السائل ، فإن :

$$\left(\frac{\delta Z}{\Delta Z}\right)_{x_1 \frac{\lambda}{2}} = 2 \left(y_2 (n_{\text{clad}} - n_L) + \Delta n y_1 - \frac{\Delta n}{a^\alpha} \int_0^{(a^2 - x_1^2)^{1/2}} (x_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy \right) \\ = 2 \left((n_{\text{clad}} - n_L) \sqrt{r_f^2 - x_1^2} + \Delta n \sqrt{a^2 - x_1^2} - \frac{\Delta n}{a^\alpha} \int_0^{(a^2 - x_1^2)^{1/2}} (x_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy \right) \quad (6.53)$$

وتعطي هذه المعادلة قيم $\delta Z / \Delta Z$ لأي قيم من قيم X_1 حيث $0 \leq x_1$ ، وذلك بدلالة α ، Δn ، وبالتعويض عن x_1 بالقيمة صفر تنتج المعادلة :

$$\left(\frac{\delta Z}{\Delta Z}\right)_{\frac{\lambda}{2}} = (n_{\text{clad}} - n_L) t_f + t_{\text{core}} \frac{\Delta n}{(\alpha + 1)} \quad (6.54)$$

حيث :

$$t_{\text{core}} = 2a$$

وكذلك :

$$t_f = 2 y_2$$

وقد توصل "Saunders and Gardner" (١٩٧٧) إلى معادلة مشابهة للمعادلة رقم (٦-٥) ، وذلك باستخدام مقياس التداخل الضوئي الثنائي في حالة $n_{\text{clad}} = n_L$ أي حالة المضاهاة .

أما في حالة الألياف STEP - index حيث $\alpha = \infty$ فلقد توصل ' بركات Barakat ' (١٩٧١) إلى المعادلة :

$$\left(\frac{\delta Z}{\Delta Z}\right)_{\frac{\lambda}{2}} = (n_{\text{clad}} - n_L) t_f + t_{\text{core}} (n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}) \quad (6.55)$$

وبالتعويض عن x_1 في المعادلة رقم (٦-٥) بقيمتين يمكن استنتاج البارامتر α بمعلومية قيم .

$$n_L, n_{\text{clad}}, \left(\frac{\delta Z}{\Delta Z}\right)_{x_2}, \left(\frac{\delta Z}{\Delta Z}\right)_{x_1}, x_2, x_1$$

وبالتعويض في المعادلة رقم (٦-٥٣) بأى قيمة لـ X ، حيث $0 \leq x \leq a$ يمكن تعيين Δn .
 واتبعت طريقة عامة لحساب كل من α , Δn باستخدام أكثر من قيمتين للمقدار $\delta Z / \Delta Z$ وهى طريقة أقل تباينا minimum variance technique .

حيث :

$$I_{\alpha}(x) = \int_0^{(a^2 - x_1^2)^{1/2}} (x^2 + y^2)^{\alpha/2} dy$$

ت حسب عدديا .

ولاتكون قيم Δn , α معروفة مقدما في المعادلة (٦-٥٣) ، والهدف هو مطابقة القيم المقاسة عمليا للبروفيل الهديبة مع المعادلة السابقة لتعيين كل من Δn , α ، ويلزم لهذا الغرض تطبيع البروفيل النظرى لبعض النقاط المقاسة عمليا ، ولندخل في الاعتبار استجابة أجهزة القياس (التكبير والعوامل الأخرى) . والنقطة المختارة هى التى تكون عندها $F(x) = \delta Z$ لاتعتمد على قيم Δn , α .

ونفترض أن المعادلة الآتية تعبر عن دالة البروفيل عند $x = a$:

$$F(a) = \frac{4\Delta Z}{\lambda} [(n_{\text{clad}} - n_L) (r_f^2 - a^2)^{1/2}]$$

وأن دالة البروفيل بعد تطبيقها تعطى العلاقة :

$$F^*(x) = \frac{F(x)}{F(a)} \delta Z_{\text{expt}} \Big|_{x=a}$$

وبإعطاء α قيما مختلفة وحساب قيم Δn لكل قيمة للبارامتر α يمكن الحصول على قيم Δn , α التى تعطى أقرب تطابق مع البروفيل الذى تم الحصول عليه عمليا .

٦/٤- تطبيق نظرية هذب تساوى الرتبة اللونية FECO على الألياف

The theory of fringes of equal chromatic order (FECO)

من المعروف أن هذب التداخل المتعدد لفيروز ، التى نحصل عليها عند سقوط حزمة من الأشعة وحيدة الطول الموجى على إسفين مقلض ، تتكون على سطح مستوى يقع بالقرب من الإسفين وهو مستوى ذو الرتبة الصفريية الذى لايعتمد موقعه على طول موجة الضوء

المستخدم . فإذا تم إسقاط مستوى على فتحة مطياف وحل مصدر ضوء أبيض محل مصدر الضوء أحادي الطول الموجي ، فإن عائلة من هذب التداخل ذات الرتبة اللونية المتساوية التي اكتشفها العالم « تولانسكى Tolansky عام ١٩٦٠ » ترى على المستوى الطيفي .

ويعتمد شكل الهذب الناتجة أساسا على الطريقة التي تتغير بها قيم $n_{\lambda} t$ على امتداد مقطع الإسفين الذي حددته فتحة المطياف ، حيث t هي البعد بين سطحي الإسفين أي بعد مقياس التداخل ، n_{λ} معامل انكسار الوسط المحصور بين سطحي مقياس التداخل . فإذا اخترنا اتجاه الفتحة ليمثل محور السينات x فإنه في هذه الحالة تمثل دالة تغير $n_{\lambda} t$ بالمختبر $f(x)$ أي $n_{\lambda} t = f(x)$. ويكون المستوى الطيفي هو (λ, x) . وعلى ذلك فإننا نحصل على شكل هذب التداخل بإجراء تحويل العلاقة $n_{\lambda} t = f(x)$ من المستوى (t, x) إلى المستوى (λ, x) باستخدام علاقة التحويل $N_{\lambda} = 2n_{\lambda} t$ ، وذلك في حالة الهذب المخيطة على خلفية مظلمة التي نحصل عليها عند التفاز ، وكذلك في حالة الهذب المعتمة على خلفية مخيطة تلك التي نحصل عليها عند الانعكاس ، إذا ما أهملتها تغير الطور عند الانعكاس . وفي حالة إسفين مفضض يحصر سائلا وكانت حافته موازية لفتحة المطياف فإن $n_{\lambda} t = k$ حيث K مقدار ثابت عند طول موجي λ محدد ، $n_{\lambda} t$ معامل انكسار السائل المحصور .

وتمثل عائلة هذب التداخل متساوية الرتبة اللونية على المستوى (λ, x) بالمعادلة :

$$\lambda_N = \frac{2k}{N}$$

حيث تأخذ N رتبة الهذبة القيم ١، ٢، ٣ . لهذا فإن هذب التداخل الناتجة في هذه الحالة هي خطوط مستقيمة وموازية لمحور x حيث الفرق في العدد الموجي Δv بين أي هذبتين متعاقبتين $(v_{N+1} - v_N) = \frac{1}{2} n_{\lambda} t$ ، حيث $n_{\lambda} t$ هو متوسط قيمتي معامل الانكسار للسائل على المدى $\lambda_N - \lambda_{(N+1)}$.

دعنا نتناول المنطقة من مقياس التداخل التي تحتوى علي الشعيرة . وتعطى المعادلة (٧-٦) طول المسار الضوئي OPL لحزمة الأشعة المركزية عند تكون هذبة مخيطة تأخذ t

قيمة ثابتة على المستوى (λ, x) لأن حافة الاسفين قد ضبطت موازية لفتحة المطياف .
وبترتيب المعادلة (٦-٥) ونقل نقطة الأصل إلى النقطة ($2n_L \lambda, \lambda^2 / N, 0$) نحصل
على المعادلة (٦-٥) :

$$\lambda^2 = (16/N^2) [(n_{s,\lambda} - n_{L,\lambda})^2 (r_f^2 - x^2) + (n_{c,\lambda} - n_{s,\lambda}) 2(r_c^2 - x^2) + 2(n_{s,\lambda} - n_{L,\lambda})(n_{c,\lambda} - n_{s,\lambda})(r_f^2 - x^2)^{1/2}(r_c^2 - x^2)^{1/2}] \quad (6.56)$$

هذه هي المعادلة المطلوبة التي تعطي مجموعة هيب التداخل الضوئي متساوية الرتبة
السونية FECO التي تعبر الشعيرة في المنطق $0 \leq x \leq r_f$ ، حيث $-r_c \leq -x \leq 0$
 $n_{L,\lambda}, n_{c,\lambda}, n_{s,\lambda}$ هي معاملات الانكسار القشرة وب الشعيرة والسائل المحصور
بالترتيب عند الطول الموجي المناظر لكل نقطة على الهبة التي رتبته N .

عند $x = 0$

$$\begin{aligned} \lambda &= (4/N) (n_{s,\lambda} - n_{L,\lambda}) r_f + (n_{c,\lambda} - n_{s,\lambda}) r_c \\ &= (2/N) (n_{s,\lambda} t_s + n_{c,\lambda} t_c - n_{L,\lambda} t_f) \\ &= (2/N) (n_{s,\lambda} - n_{L,\lambda}) t_f \end{aligned}$$

حيث $n_{s,\lambda}$ هي معامل الانكسار المتوسط الذي تعرفه المعادلة (٦-١١) للطول الموجي
المناظر للنقطة على الهبة ذات الرتبة N عند $x = 0$. فمثلا الطول الموجي λ عند النقطة b
على الهبة التي رتبته $(N + 1)$ - انظر شكل (٦-١٤) - توضع رسما تخطيطيا للمعادلة
(٦-٥) .

والنقطة ($2n_L \lambda, \lambda^2 / N, 0$) هي نقطة تقاطع امتداد الجزء المستقيم من الهبة التي
رتبتها N في منطقة السائل مع محور الشعيرة ، كما هو موضح بالنقطة o في الشكل رقم
(١٤/١) للهبة التي رتبته $(N + 1)$.

وفي حالة شعيرة تحوى وسطا واحدا تكون $n_{s,\lambda} = n_{c,\lambda} = n_\lambda$ ، ونحصل على شكل
الهيب بالتعويض في المعادلة (٦-٥) ، فهي تماثل شكل الهيب عبر شعيرة في المنطقة
 $r_c \leq x \leq r_f$ ، ويمثل شكل الهيب بالمعادلة :

$$\lambda^2 / (4/N) [(n_\lambda - n_{L,\lambda}) r_f]^2 + x^2 / r_f^2 = 1$$

وتمثل هذه المعادلة مجموعة من القطع الناقصة ذات المحور الأكبر والمحور الأصغر r_F/N , r_F/N على الترتيب للقيم الصحيحة المتتابعة الرتبة N .
 وفي حالة شعيرة تحوى وسطا واحدا أى متجانسة التركيب ومعامل انكسار مادتها n_L ، يتغير طول المحور الرئيسى لأى قطع ناقص مع $(n_L - n_{L,1}) / N$ ، n_L ، $n_{L,1}$ هما معامل انكسار الشعيرة والسائل المحصور على الترتيب لطول الموجة التى يحدهما رأس القطع الناقص ، أى هدبة التداخل ذات الرتبة N عند $x = 0$. وفى الشكل (١٤/٦) هذا الطول الموجى يحده النقطة a على المنحنى المتقطع لرتبة التداخل $(N + 1)$. ويوضح الشكل (١٤/٦) الحالات الثلاث التى سوف نتناولها وفى الميمنة بالمنحنيات المتقطعة .

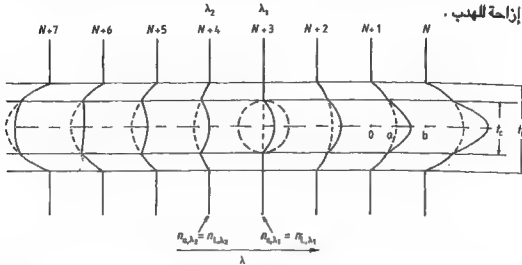
أ- عندما تكون $n_L > n_{L,1}$ هذه هى حالة الهدب ذات الرتب N , $(N + 1)$, $(N + 2)$.
 ب- عندما تكون $n_{L,1} = n_L$ أى حالة المضاهاة عند هذا الطول الموجى . وفى هذه الحالة لاتحدث إزاحة للهدبة أثناء عبورها من منطقة السائل إلى منطقة الشعيرة التى تعلدها $r_C \leq x \leq r_F$. يحدث هذا عند الهدبة ذات الرتبة $(N + 3)$ ، كما هو موضح فى الشكل (١٤/٦) ومنه يمكن تعيين λ_1 .

ج- عندما تكون $n_L < n_{L,1}$ ، نحصل على هدب تداخل محدبة فى اتجاه الطول الموجى الأصغر . هذه هى حالة الهدب ذات الرتب $(N + 4)$, $(N + 5)$, $(N + 6)$.
 وفى حالة شعيرة متكونة من قشرة وباب وفى المنطقة $0 \leq x \leq r_C$ وكذلك لصورتها فى مرآة مستوية وضعت على محور الشعيرة يمثل الهدب الناتجة المنحنيات المتصلة الموضحة فى الشكل (١٤/٦) . وعندما تكون $n_{L,1} = n_{s,1}$ فإن إزاحة الهدب عند $x = 0$ بين الهدبة فى منطقة السائل والهدبة عبر الشعيرة تساوى $4r_C/N$ $(n_{c,1} - n_{s,1})$ وفى حالة $n_{c,1} > n_{s,1}$ يمثل شكل هدب التداخل متساوية الرتبة اللونية فى هذه المنطقة بالمنحنيات المتصلة المناظرة للهدبة التى رتبته $(N + 3)$ ، كما هو موضح فى الشكل (١٤/٦) . أما فى حالة تساوى $n_{L,1}$ مع $n_{s,1}$ حيث :

$$n_{s,1} = (n_{c,1} t_c + n_{s,1} t_s) / t_f$$

فإنه لا يحدث إزاحة للهدبة عند $x = 0$ عند انتقالها من منطقة السائل إلى الشعيرة . هذا ماتوضحه الهدبة التى رتبته $(N + 4)$ فى الشكل (١٤/٦) وممثلة بالمنحنى المتصل .

ولقد استخدم "Faust" (١٩٥٤) هيب التداخل متساوية الرتبة اللونية في تعيين معامل الانكسار المتوسطة للألياف . ولقد اعتمدت طريقته على استخدام التقط التي لا يحدث عندها



شكل رقم (١٤/٦) : رسم تخطيطي للهدب التداخل الضوئي متساوية الرتبة اللونية FECO هيب شعيرة مغمورة في سائل يحصره مقياس التداخل . تعبر الخطوط المتقطعة عن الهدب في حالة شعيرة متجانسة التركيب في حين تعبر الخطوط المتصلة عن حالة شعيرة سمكها a ذات ab سمك b محاط بقشرة ، والهدبة ذات الرتبة $N + 3$ تكون $n_{L,\lambda 1} = n_{S,\lambda 1}$ كما هو موضح في الشكل ، في حين أنه للهدبة ذات الرتبة $N + 4$ تكون $n_{L,\lambda 2} = n_{S,\lambda 2}$ (من Barakat, 1971)

٥/٦- تطبيق طرق التداخل الضوئي المتعدد لتعيين بعض الخصائص الفيزيائية للألياف

Applications of multiple-beam interferometric methods to the determination of some physical properties of fibres :

تقدم معاملات انكسار الألياف التركيبية والطبيعية - للضوء المستقطب في اتجاه محور الشعيرة وفي الاتجاه العمودي عليه - طريقة مناسبة لقياس مدى ترتيب الجزيئات بالنسبة لمحور الشعيرة . كما تعطى قياسات معاملات الانكسار المزدوج للقشرة وباب الشعيرة مقياسا لدرجة تشتت الجزيئات بالنسبة إلى اتجاه معين . وتساعد هذه المطومات في التعرف على تركيب الألياف متباينة الخواص الضوئية . وتعتبر طرق التداخل الضوئي المتعدد أداة هامة

فى علم الألياف Fibre science ، فهى تقدم قياسات دقيقة لمعاملات انكسار لب وقشرة الألياف الطبيعية والتركيبية وكذلك الانكسار المزدوج birefringence لكل طبقة من طبقات الشعيرة . ويمكن طرق التداخل الضوئى المتعدد من تعيين قيم تغير معاملات انكسار الألياف مع :

- أ- طول موجة الضوء المستخدم $(dn/d\lambda)$ أى مقدار تفرقها للضوء .
- ب- درجة الحرارة (dn/dT) أى الخصائص الضوئية - الحرارية opto-thermal .
- ج- درجة الشد والاستطالة لوحدة الأطوال ، أى الخصائص الضوئية - الميكانيكية opto-mechanical .

وكذلك فإن هذب التداخل الضوئى المتعدد تعطى معلومات كمية عن الخصائص الضوئية لكل من قشرة وباب الشعيرة ومقدار تغير كل منهما على امتداد محور الشعيرة ، وذلك فى الألياف غير متجانسة التركيب Heterogeneous fibres ، ويمكن استخدام هذه الهذب فى حالة الألياف الطبيعية والتركيبية ذات المقاطع العرضية المنتظمة وغير المنتظمة والألياف المبرومة Twisted fibres .

وتسمح طرق التداخل الضوئى المتعدد بتعيين بروفيل معامل انكسار قشرة وباب الشعيرات ، وذلك فى الألياف البصرية ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة STEP ، وكذلك متدرجة معامل الانكسار GRIN ، وهى تعطى معلومات عن تركيب هذه الألياف وكذلك عن الألياف متعددة الطبقات المتراكبة multi-layer structure للب الشعيرة ، والبارامتر α الذى يحكم تغير معامل انكسار لب الشعيرة مع المسافة من مركز الشعيرة . وتساعد هذه المعلومات فى ضبط عملية تصنيع الألياف البصرية بالطريقة الكيميائية المعدلة لتحضير الألياف بترسيب الأبخرة MCVD .

وتتميز هذب التداخل الضوئى المتعدد بكونها حادة جداً ، وبذلك فإنها تعطى قياسات دقيقة لإزاحات هذه الهذب داخل الشعيرات ، وتتناسب قيمة إزاحة الهذب مع ضعف فرق الطور الذى نشأ عن وجود الشعيرة . ولذلك فإن طريقة هذب التداخل الضوئى المتعدد أدق من طريقة التداخل التناثنى - Tolansky, 1948 .

ولاستكمال الصورة بالنسبة لترتيب الجزيئات داخل الشعيرة فإن هذه الدراسات الضوئية تؤخذ في الاعتبار بجانب طرق الفحص الأخرى مثل استخدام حيود الأشعة السينية والميكروسكوب الإلكتروني والتحليل الطيفي بالامتصاص الجزيئي .

وسندرس في الفصل السابع طريقة فحص تضاريس سطح الأغياض باستخدام طرق التداخل الضوئي .

١/٥- النظام البصري المستخدم وطريقة تكوين هدب التداخل الضوئي المتعدد

Experimental arrangement and procedure for forming multiple-beam interference fringes :

استخدم « تولانسكي » الإسفين الضوئي في الحصول على هدب التداخل المتعدد (Tolansky, 1948,60) . وطلبت هذه الهدب لتعيين معاملات الانكسار والانكسار المزوج للألياف ، وذلك عن طريق قياس فرق المسار الضوئي عند غمر شعيرة في سائل محصور بين مسطحين ضوئيين مقضضين يميل أحدهما على الآخر بزاوية صغيرة .

وقدم « فاوست Faust » (١٩٥٢ ، ١٩٥٤) طريقة لتطبيق ميكروسكوب التداخل الضوئي لتعيين تغير معاملات الانكسار في عينات غير متجانسة ضوئياً - optically heterogeneous specimens وعين معامل الانكسار المتوسط للشعيرة باستخدام هدب تساوي الرتبة اللونية White light fringes of equal chromatic order .

وشرح « بركات والحناوي Barakat and El-Hennawi » (١٩٧١) النظام البصري المستخدم للحصول على هدب التداخل الضوئي المتعدد ، وفيه تسقط حزمة متوازية من الأشعة - أحادية طول الموجة والمستقطبة استوائياً - على الإسفين الضوئي الموضوع على قاعدة الميكروسكوب بحيث يكون السقوط عمودياً - وبين الشكل رقم (١٥/٦) النظام البصري المستخدم للحصول على هدب تداخل ضوئي عند النفاذ وعند الانعكاس . ويتكون الإسفين الضوئي من مسطحين ضوئيين مستديرين ، قطر كل منهما ٣٥ ملليمتر وسماك كل منهما ٧ ملليمتر ، وكانت درجة الاستواء تساوي ± 0.1 ميكرومتر .

والحصول على هيب تداخل ضوئى عند التناز يغطى الوجه الداخلى لكل مسطح ضوئى بطبقة من الفضة ذات انعكاسية كبيرة ودرجة نقاذية قليلة نسبيا ، ويمكن الحصول على ذلك بالتبخير الحرارى للفضة عند ضغط اقل من 10^{-5} تور (مليمتر زئبق) بحيث تكون انعكاسيتها للضوء اعلى من ٧٥٪ ونقايتها حوالى ٢٢٪ .

أما فى حالة هيب التداخل الضوئى عند الانعكاس فإن انعكاسية المسطح الضوئى الاسفل تكون أكثر من ٩٠٪ والمسطح العلوى تكون حوالى ٧٠٪ . ويوضع المسطحان الضوئيان فى حامل "Zig" وتوضع على المسطح الضوئى الأسفل نقطة من سائل معامل انكساره يقارب معامل انكسار مادة الشعيرة (مقاسا بطريقة الحد الفاصل لبيك مثلا) ، وتغمر الشعيرة فى السائل وتثبت نهايتها على حافتى المسطح الضوئى ، ويوضع المسطح الضوئى العلوى فى مكانه من الحامل لى يتكون الإسفين الضوئى .

وفى الفحص بطريقة التداخل الضوئى وفى غير حالة تناول التفرق الضوئى فإنه يفضل عمل غطاء متعدد الطبقات multilayer coating من مادة عازلة معامل انكسارها صغير (L) ومادة عازلة أخرى معامل انكسارها كبير (H) ، وتستخدم الطبقات بالترتيب L ... LHLH بدلا من الفضة لتزيد الانعكاسية لىون زيادة فى الامتصاص . وتؤدى هذه الطريقة إلى الحصول على هيب حادة ضئيلة العرض . ويوضع الإسفين الضوئى على قاعدة الميكروسكوب وتضبط الفجوة الضوئية والزاوية بين المسطحين الضوئيين المكونين لهذا الإسفين - يتم ذلك باستخدام ثلاثة مسامير محورية screws حفرت مواقعها على محيط حامل المسطحين الضوئيين - ويتم الحصول على هيب حادة تمر الشعيرة عمودية على محورهما . وينبغى التخلص من التلخف فى الطور بين الأشعة المنعكسة المتعاقبة الذى يمثل تباعدا عن قيمة ثابتة ويزداد مع زيادة رتبة الشعاع المنعكس .

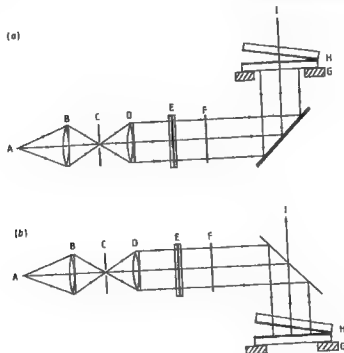
والتلخف الطورى δ تعطيه المعادلة :

$$\delta = (2\pi/\lambda) \frac{4}{3} n_L t e^2$$

وعندما يتم تقليص التلخف الطورى يسمح ذلك لعدد كبير من الأشعة المنعكسة بالمشاركة فى تكوين الهيب وبذلك تتكون هيب حادة ضئيلة العرض بالنسبة للمسافة بين هيبتين

متتاليتين وفي حالة الألياف الطبيعية والتركيبية يكون سمك الشعيرة أقل من ١٠٠ ميكرومتر ، ولهذا يسهل الحصول على فجوة ضوئية صغيرة نسبيا ، كما أن زاوية الإسفين ϵ ينبغي أن تكون صغيرة أيضا وذلك باستخدام مسطحين ضوئيين قطر كل منهما ٢٥ ملليمتر .

ولكن في حالة دراسة الألياف البصرية بنوعها GRIN, STEP يكون سمك الشعيرة ١٢٥ ميكرومتر ولهذا يفضل استخدام إسفين ضوئي مكون من مسطحين قطر كل منهما ١٠٠ ملليمتر . ويعطى النظام البصري مقطعا عرضيا كبيرا للشعاع الضوئي أحادي طول الموجة الذي يستخدم كمصدر ضوئي للإسفين . وتتخذ زاوية الإسفين الضوئي القيمة من 10° إلى 30° زاوية نصف قطرية وهي تحدد المسافة بين كل هبتين متتاليتين fringe spacing في منطقة السائل .



شكل رقم (١٥/٦) : النظام البصري المستخدم للحصول على هذب فيزي للتداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ (a) وعند الانعكاس (b) مصباح زئبق ، B عدسة مجمعة ، C فتحة دائرية ، D عدسة مجمعة ، E مستقطب ، F مرشح ضوئي ، G قاعدة الميكروسكوب ، H مقياس التداخل الضوئي ، I اتجاه الضوء إلى الكاميرا المركبة على الميكروسكوب .

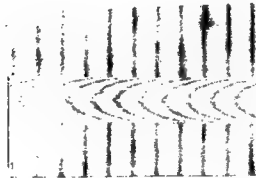
وتكون هدب التداخل الضوئى المتعدد فى منطقة السائل على هيئة خطوط مستقيمة موازية لحافة الإسفين الضوئى ، والمسافة بين كل هدبتين متتاليتين ΔZ تعطىها المعادلة :

$$\Delta Z = \lambda/2 n_L \tan \epsilon$$

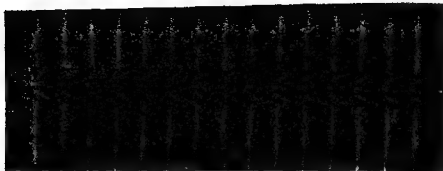
وعندما تعبر السطح الفاصل بين السائل وقشرة الشعيرة دائرية المقطع العرضى فإن هذه الهدبة تتبع مساراً على هيئة قطع ناقص تم استنتاجه رياضياً فى هذا الفصل . وتوضح الأشكال (١٦/أ) ، (١٧/أ) ، (١٨/أ) أمثلة لخرائط هدب التداخل الضوئى لبعض الألياف .



شكل رقم (١٦/أ) : هدب التداخل الضوئى المتعدد عند الانعكاس عبر شعيرة طبيعية (وبر الجمل) ، سمكها ٤٠ ميكرون (من Barakat et al., 1975)



شكل رقم (١٧/أ) : هدب التداخل الضوئى المتعدد عند الانعكاس لشعيرة وحيدة المنوال ثابتة معامل انكسار لها ذات سمك يساوى ٨ ميكرون



شكل رقم (١٨/١) : هذب التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ لشعيرة مبيدة المنوال متدرجة معامل انكسار لها (سلك الشعيرة = ١٢٥ ميكرون وسك لها = ٥٠ ± ١ ميكرون)

٢/٥/١- الخصائص الضوئية - الحرارية للألياف

Opto-thermal properties of fibres

يتم تعيين تغير معامل انكسار الألياف بتغير درجة حرارتها dn/dT بتكوين هذب فيزى للتداخل الضوئى لمنطقة من الشعيرة مغمورة فى سائل موضوع فى إسفين ضوئى وذلك عند درجات الحرارة T_1, T_2 ، وتحسب قيمة $T_1, T_2, (n_a)$ من تعيين قيم $\delta Z / \Delta Z$ فى حالتى استخدام ضوء مستقطب فى مستوى مواز لمحور الشعيرة وفى المستوى العمودى عليه أو تحسب قيم معاملات انكسار الألياف عند درجات الحرارة المختلفة بقياس المساحة المحصورة تحت ازاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة - وذلك بمعرفة قيمتى n_L عند كل من درجتى الحرارة T_1, T_2 ، وكانت نتيجة قياس dn/dT لألياف الاكرليك تساوى $2.5 \times 10^{-4} / ^\circ C$ - ١٠ / درجة مئوية -، Barakat and El-Hennawy - وقيست هذه القيم لألياف الدراكون المشبعة باشعة جاما (٢٢، ٦ ميجاراد) تحت ضغط منخفض -، Hamza and Mabrouk - 1988 - وكانت النتيجة كالآتى فى مدى درجات الحرارة من ٢٦ إلى ٢١٠°م :

$$dn_a^{\parallel} / dT = -9 \times 10^{-4} \cdot ^\circ C^{-1}$$

$$dn_a^{\perp} / dT = 7.5 \times 10^{-4} \cdot ^\circ C^{-1}$$

٢/٥/١- دراسة الخصائص الضوئية - الميكانيكية للألياف بصرية التداخل الضوئي :

Interferometric investigations of opto-mechanical properties of fibres :

يكون للألياف التركيبية المشدودة أو في حالة شد drawn or extended state قيم متباينة من ناحية الخصائص الضوئية وكذلك الميكانيكية . وتعتمد قيمة هذا التباين degree of anisotropy في الألياف المشدودة على قيمة الشد الذي وقع على الشعيرة . وتقدم دراسة قيم الخواص الضوئية المتباينة optical anisotropy طريقة مناسبة لتحسين نظام ترتيب الجزيئات في شرائح من البلمرات .

ولقد طور "Kuhn and Grün" (١٩٤٢) نظرية تعطي العلاقة بين التركيب الجزيئي للبلمرات أحادية المحور uniaxially oriented polymer وخواصها الضوئية المتباينة optical anisotropy .

كما قدم "de Vries" (١٩٥٩) تحليلاً للعلاقة بين الانكسار المزدوج ونسبة السحب draw ratio في حالة الألياف التركيبية .

ودرس "Pinnock and Ward" (١٩٦٤) مجموعة كبيرة من ألياف البولي إستر ، لها نسب سحب مختلفة ، كما درسوا الخواص الميكانيكية والضوئية لهذه الألياف على أساس نظري وبمعلومية تنظيم الجزيئات داخل مركباتها .

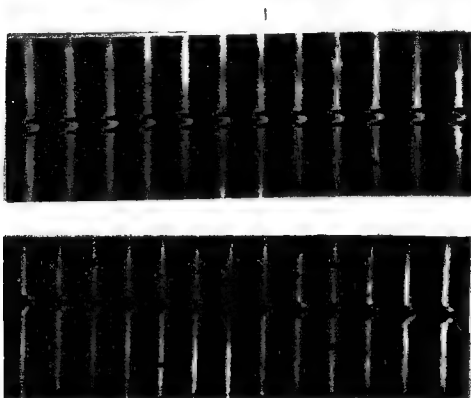
وتناول "Barakat and Hindeleh" (١٩٦٤b) تأثير الشد على معامل الانكسار والانكسار المزدوج لألياف فسكوز الرايون بالتداخل الضوئي .

كما درس "Hamza and Kabeel" (١٩٨٧) الخواص الضوئية المتباينة لألياف البولي بروبيلين وتغيرها بتغير نسبة سحب الشعيرات .

وبيّن الشكلان (١٩/١) ، (٢٠/١) خرائط لهدب فيزول للتداخل الضوئي المتعدد عند نفاذ الأشعة ، وذلك لألياف البولي بروبيلين المشدودة بنسبة سحب ٣ ، ٤ على الترتيب ، وكان الضوء مستقطباً واهتزازاته في اتجاه محور الشعيرة وكذلك في الاتجاه العمودي على هذا

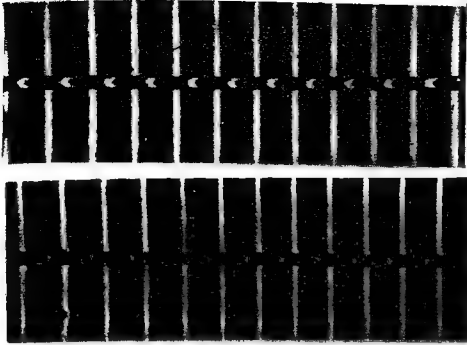
المحور . وتم تعيين قيم $n_c^\perp, n_c^\parallel, n_a^\perp, n_a^\parallel$ ومقدار تغير الإنكسار المزدوج بتغير نسبة السحب .

ويبين الشكل رقم (٢١/١) تركيب جهاز دقيق لقياس الخواص الضوئية - الميكانيكية Opto-mechanical للألياف - (Hamza et al., ١٩٨٧) .

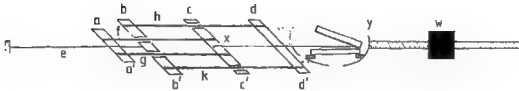


ب

شكل رقم (١٩/١) : هيب التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ لشعيرة من ألياف البولي بروبيلين ذات نسبة سحب الضوء المستقطب استوائيا : (أ) يتلذب في اتجاه مواز لمحور الشعيرة ، (ب) يتلذب في اتجاه عمودي على المحور (من Hamza and Kabeel, 1987)



شكل رقم (٢٠/٦) : هدب التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ لشعيرة من ألياف البولي بروبيلين ذات نسبة سحب ٤ للضوء المستقطب استوائيا : (أ) تذبذب في اتجاه مواز لمحور الشعيرة ، (ب) يتذبذب في اتجاه عمودي على المحور (من Hamza and Kabeel, 1987)



شكل رقم (٢١/٦) : رسم تخطيطي لجهاز شد $2d$ قضيب قابل للحركة ، $C'C$ قضيب منزلق ، g, f قضيبان قابلان للانزلاق ، bb' إطار ثابت ، e قضيب مستخدم في شد الشعيرة ، x مثبت لأحد طرفي الشعيرة ، w كتلة قابلة للحركة لجعل الجهاز مستقرا ، y مقياس للتداخل الضوئي . (من Hamza et al., 1987)

٨/٥-١- تفريق الألياف للضوء : Dispersion properties of fibres

يقاس معدل تغير معامل انكسار الألياف للضوء بالنسبة للتغير في طول موجة الضوء $dn_g/d\lambda$ بطرق التداخل الضوئي ، وذلك بتطبيق هـب التداخل المتعدد لفيوز أو تطبيق هـب تساوي الرتبة اللونية على الألياف . وتؤدي كلتا الطريقتين إلى تعيين الثوابت B, A لمعادلة « كوشى » للتفرق الضوئي Cauchy's dispersion formula :

$$(n_g)_\lambda = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

وعند تطبيق هـب فيوز للتداخل الضوئي تستخدم أطوال موجية مختلفة كمصادر للضوء الذى يسقط على إسفين ضوئي يحتوى على سائل غمرت فيه شعيرة من الألياف ، وتتكون خريطة لهـب التداخل الضوئي لكل طول موجة ، ويصدر عن مصباح الزئبق أو مصباح الزئبق - كاديوم عدد مناسب من الخطوط الطيفية التى تعطى الطول الموجى المطلوب باستخدام مرشح ضوئي مناسب .

ويمكن قياس قيمة $(\frac{\delta Z}{\lambda^2})$ فى كل حالة من حالات استقطاب الضوء واهتزازاته فى الاتجاه الموازى لمحور الشعيرة والاتجاه العمودى عليه ، ونستنتج قيمة $(n_g)_\lambda, (n_g)_\lambda$ ومدى تغير كل منها بالنسبة إلى $1/\lambda^2$.

ويمكن تعيين قيمتى الثابتين B, A لمعادلة « كوشى » للتفرق الضوئي فى حالة التفرق العادى normal dispersion ، أى عندما تكون العلاقة بين $n_g, 1/\lambda^2$ تمثل خطا مستقيما .

وطبق "Hamza and Mabrouk" (١٩٨٨) طريقة فيوز على ألياف الدراون المشبعة بلشعة جاما وبجرعة إشعاعية مقدارها ٥٥٩ ، ٢٢ ميجاراد مستخدمين الأطوال الموجية الصادرة من مصباح الزئبق ، وكان الضوء مستقطبا واهتزازاته فى الاتجاه الموازى على محور الشعيرة ، وتم حساب قيمتى ثابتى معادلة « كوشى » :

$$A = 1.5149 \quad \text{and} \quad B = 15.53 \times 10^2 (\text{nm})^2$$

٨/٥-٥- هـب تساوي الرتبة اللونية : Fringes of equal chromatic order

بإسقاط هـب فيوز للتداخل الضوئي المتعدد التى تم الحصول عليها بالطريقة التى سبق

نذكرها على فتحة المطياف prism or grating spectrograph ، واستبدال المصدر الضوئي أحادي اللون بمصدر ضوئي أبيض (pointolite) ، وبضبط حافة الإسفين الضوئي لكي تكون موازية لفتحة المطياف - تتكون هذب تساوى الرتبة اللونية وتظهر على هيئة خطوط مستقيمة فى منطقة السائل (Tolansky, 1960) . وعندما تعبر هذه الهذب الشعيرة تحدث إزاحات تختلف باختلاف طول موجة الضوء وباختلاف مستوى استقطاب اهتزازات الضوء (مواز أو عمودى على محور الشعيرة) .

ويوضح الشكل (٣/٦) - السابق - النظام البصرى المستخدم للحصول على هذب تساوى الرتبة اللونية (FECO) ، وعندما لاتعاني الهدبة أية إزاحة عندما تعبر الشعيرة يدل ذلك على أن معامل انكسار مادة الشعيرة n_g يساوى معامل انكسار السائل n_L عند طول موجة الضوء λ_1 أى حالة مضاهاة . وعند تغير درجة الحرارة قليلا فإن المضاهاة بين معاملى انكسار السائل والشعيرة تتم عند طول موجى آخر λ_2 ، ويتم رسم منحنيات تفرق السائل للضوء فى المدى المستخدم من الأطوال الموجية ودرجات الحرارة بين T_1 ، T_2 ، وذلك باستخدام مقياس معامل الانكسار ومنظم لدرجات الحرارة Thermostat ومصدر ضوئي أحادى طول الموجة . ويمكن تعيين معامل انكسار مادة الشعيرة n_g عند الطول الموجى المطلوب وذلك من هذه المنحنيات ، ويمكن كذلك تعيين ثابتى معادلة « كوشى » للتفرق الضوئى عندما يكون هذا التفرق عابيا normal dispersion . ولقد طبق Barakat and Hindeleh (١٩٦٤) هذه الطريقة على ألياف رايون الفسكون وتم حساب ثابتى كوشى ، وكانت النتيجة كما يلى :

$$A = 1.5391 \quad \text{and} \quad B = 266.666 \text{ (nm)}^2$$

واستخدمت هذب تساوى الرتبة اللونية FECO لتعيين معامل الانكسار المزوج لألياف الاكريلان Barakat and El-Hennawi, 1971 .

وقد نشر "Hamza" (١٩٨٦) ملخصا شاملا لتطبيقات هذب فيزى للتداخل الضوئى وهذب تساوى الرتبة اللونية على الألياف - جدول رقم (١/٦) - ونوصى بالرجوع إلى المراجع الاصلية المذكورة فى هذا الجول للحصول على تفاصيل أكثر .

Table 6.1 Application of multiple-beam interferometry to the study of fibre properties.

Author	Method	Object of study and application	Results
Fauat (1952, 1954)	Multiple-beam interferometry	Determination of refractive index variation within optically heterogeneous specimens	The skin effect in rayon fibres is discussed and values of n^2 and n^2 for both skin and core are given
Barakat and Hindieh (1964a)	Multiple-beam interferometry	To determine refractive indices and birefringence of mohair wool fibres	Variation of refractive indices and birefringence along the fibre axis is given. Thermal coefficient of refractive index of the mohair fibre is determined and found to be $7.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Barakat and Hindieh (1964b)	Multiple-beam interferometry	To determine refractive indices, birefringence and tensile properties of viscose rayon fibres	The birefringence of viscose rayon fibres is increased by increasing the tenacity of these fibres
Barakat (1971)	Multiple-beam interferometry	Derivation of mathematical expression for the shape of multiple-beam Fizeau fringes and associated white light fringes of equal chromatic order crossing a fibre of circular cross section having a core surrounded by a skin	The refractive indices and birefringence can be calculated for both skin and core of such fibres. The optical power of a cylindrical fibre was calculated for a parallel beam of monochromatic light incident on the fibre
Barakat and El-Hennawi (1971) Barakat et al (1975)	Multiple-beam Fizeau fringes and the white fringes of equal chromatic order	Measurement of refractive indices and birefringence of acrylic and camel-hair fibres	For acrylic fibres, $n^2 = 1.518$, $n^2 = 1.519$ and $\Delta n = 0.001$ at 35°C For camel-hair fibres, $n^2 = 1.539$, $n^2 = 1.546$ and $\Delta n = 0.015$ at 21.5°C
Hindieh (1978), Hamza and Sokkar (1981)	Multiple-beam Fizeau fringes	Study of the optical anisotropy in cotton fibres	The values of the mean refractive indices n_x and n_y and birefringence of cotton fibres differ for different varieties
Krishna Iyer et al (1969)	White light fringes of equal chromatic order		
Hamza et al (1980 a,b)	Interference and multiple-beam Fizeau fringes	Investigation of the difference in mean orientation of skin and core, for polyethylene and polypropylene fibres.	The refractive indices of each layer of the fibre and their variations with wavelength of light were determined
El-Nikhawy and Fouda (1980 a,b), Fouda and El-Nikhawy (1981), Fouda et al (1981), Hamza et al (1982)	Fizeau method	Derivation of mathematical expressions for the shape of multiple-beam Fizeau fringes and their application to determine refractive indices of multiple-skin fibres	The optical properties of multiple-skin fibres of elliptical, rectangular, kidney and dog-bone cross sections are given
Barakat and El-Hennawi (1971), Hamza and Abd El-Kader (1983).	Fizeau method	Description of a method suitable for evaluating small birefringence in fibres and its application to acrylic and cuprammonium fibres	The results are in good agreement with those obtained from the double-beam microinterferometric method
Sokkar and Shahim (1985), Hamza et al (1984, 1985 a,b,c)	Double-beam and multiple-beam microinterferometry.	Determination of the optical anisotropy of fibres with irregular transverse sections.	Accurate results are obtained when considering the area under the interference fringe shift represented by the path difference integrated across the fibre. Values of refractive indices and birefringence for the skin and core of a fibre having irregular transverse sections are given

References

- Barakat N 1957 Proc. Phys. Soc B IXX 220
- Barakat N 1971 Textile Res. J. 41 167
- Barakat N and El-Hennawi H A 1971 Textile Res. J. 41 391
- Barakat N, Hamza A A and Fouda 1975 Egypt. J. Phys. 6 91
- Barakat N, Hamza A A and Goneid A S 1985 Appl. Opt. 24 4383
- Barakat N, and Hindeleh A M 1964a Textile Res. J. 34 357
- Barakat N, and Hindeleh A M 1964b Textile Res. J. 34 581
- Barakat N, and Mokhtar S 1963 J. Opt. Soc. Am. 53 159
- Brossel J 1947 Proc. Phys. Soc. 59 224
- El- Hennawi H A 1988a Egypt. J. Phys. in press
- El- Hennawi H A 1988b Egypt. J. Phys. in press
- El- Hennawi H A 1988c Egypt. J. Phys. in press
- El- Nicklawy M M and Fouda I M 1980a J. Textile Inst. 71 252
- El- Nicklawy M M and Fouda I M 1980b J. Textile Inst. 71 257
- Faust R C 1952 Proc. Phys. Soc. B 65 48
- Faust R C 1954 Proc. Phys. Soc. B 67 138
- Feussner W 1927 Gehrckés Handbook der Physik Optik vol. 1
- Fouda I M and El-Nicklawy M M 1981 Acta Phys. Polon. A 59 95
- Fouda I M, Hamza A A, El-Nicklawy M M and El-Farahaty K A 1981 Textile. Res. J. 51 355
- Gloge D and Marcatili E A J 1973 Bell Syst. Tech. J. 52 1563
- Hamza A A 1980 Textile Res. J. 50 731
- Hamza A A 1986 J. Microsc. 142 35
- Hamza A A and Abd El-Kader H I 1983 Textile Res. J. 53 205
- Hamza A A, Fouda I M and El-Farahaty K 1982 Acta Phys. polon. A 61 129
- Hamza A A, Fouda IM, El-Farahaty K A and Badawy Y K M 1980a Textile Res. J. 50 592
- Hamza A A, Fouda I M and El-Farahaty K A and Badawy Y K M 1980b Acta Phys. Polon. A 58 651
- Hamza A A, Fouda I M, El-Farahaty K A and Helaly S A 1987 Polym. Test. 7 329

- Hamza A A, Fouda I M, Hashish A H and El-Farahaty K A 1984 Textile Res. J. **54** 802
- Hamza A A and Kabeel M A 1986 J. Phys. D : Appl. Phys. **19** 1175
- Hamza A A and Kabeel M A 1987 J. Phys. D : Appl. Phys. **20** 963
- Hamza A A and Mabrouk M A 1988 Radiat. Phys. Chem, **32** 645
- Hamza A A and Sokkar T Z N 1981 Textile Res. J. **51** 485
- Hamza A A, Sokkar T Z N and Kabeel M A 1985a J. Phys. D : Appl. Phys. **18** 1773
- Hamza A A, Sokkar T Z N and Kabeel M A 1985b J. Phys. D : Appl. Phys. **18** 12321
- Hamza A A, Sokkar T Z N and Kabeel M A 1986 J. Phys. D : Appl. Phys. **19** L19
- Hamza A A, Sokkar T Z N and Shahin M M 1985c J. Microsc. **137** 85
- Hindeleh A M 1978 J. Phys. D : Appl. Phys. **11** 2335
- Krishna Iyer K R, Neeleakantan P and Radhakrishnan T 1969 J. Appl. Polym. Sci. **7** 983
- Kuhn W and Gr \ddot{u} n F 1942 Kolloid Z. **101** 248
- Marhic M E, Ho P S and Epstein M 1975 Appl. Phys. Lett. **26** 574
- Mokhtar S 1964 Ph D Thesis Ain Shams University, Egypt
- Saunders M J and Gardner W B 1977 Appl. Opt. **16** 2368
- Simmens S C 1958 Nature **18** 1260
- Sokkar T Z N and Shahin M M 1985 Textile Res. J **55** 139
- Pinnock P R and Ward I M 1964 Br. J. Appl. Phys. **15** 1559
- Tolansky S 1948 Multiple- Beam Interferometry (Oxford : Clarendon)
- Tolansky S 1960 Surface Microtopography (London : Longmans, Green)
- de vries H 1959 J. Polym. Sci. **34** 761

الفصل السابع

دراسة طبغرافية سطح الألياف بالتداخل الضوئي

Interferometric Determination of Fibre Surface Topography

استخدمت طرق التداخل الضوئي لفحص أسطح المواد للتعرف على معالم وتفاصيل تضاريسها . وطبقت كل من طرق التداخل الضوئي الثنائي والمتعدد لإجراء هذا الفحص . وأجرى « تولانسكى Tolansky » ومجموعته (١٩٤٨ ، ١٩٥٢ ، ١٩٦٠) دراسة مكثفة لطبغرافية البلورات وكذلك أسطح المعادن . واستخدمت في هذا المجال هذب التداخل الضوئي المتعدد محددة الموقع عند النفاذ وعند الانعكاس .

١/٧- تطبيق هذب التداخل الضوئي المتعدد محددة الموقع النافذة لدراسة طبغرافية الأسطح :

Multiple-beam localised interference systems in transmission applied to surface topography :

تم في الفصل السادس شرح النظام البصري المستخدم للحصول على هذب التداخل الضوئي المتعدد الذي طوره « تولانسكى Tolansky » لدراسة تضاريس أسطح الأجسام الشفافة وهو نفس النظام الذى استخدم لتعيين معامل انكسار الألياف باستخدام طريقة التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ فيما عدا طريقة تكوين مقياس التداخل الضوئي .

ففى حالة فحص الخواص الضوئية للألياف تغمر الشعيرة فى سائل موضوع بين مسطحين ضوئيين مضغضين يميل أحدهما على الآخر ، بينما فى حالة دراسة طبغرافية سطح من مادة شفافة - كالألياف مثلا - فإن هذب فيزى للتداخل الضوئي المتعدد تتكون من الأشعة المنعكسة من السطح المراد فحصه ومن مسطح ضوئى يعتبر مرجعا .

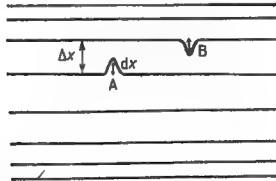
وتتكون مجموعة الهذب هذه فى مكان محدد فى الفراغ يقع بالقرب من مقياس التداخل الضوئى ، ويغطى السطحان بطبقة من الفضة لها انعكاسية كبيرة وتغاثيتها جزئية ، وذلك بالتبخير الحرارى للفضة عند ضغط منخفض (أقل من 10^{-6} تور) . وتوضع الشعيرة وكذلك

المسطح الضوئي بعد تغطيتها بطبقة من الفضة في حامل "Jig" لتكون مقياس التداخل الضوئي - شكل رقم (١/٧) - الذي يحصر شريحة من الهواء . وتتكون هدب فيزيو للتداخل الضوئي عند النفاذ . وتظهر هذه الهدب على هيئة خطوط مستقيمة حادة ومضيئة موازية لمحور الشعيرة . ويتناقص البعد بين كل هدبتين كلما بعدنا عن محور الشعيرة . وتظهر التفاصيل الدقيقة المكونة لطبغرافية سطح الشعيرة على شكل تعرجات في الهدب تنتج من الارتفاعات والانخفاضات الموجودة على سطح الشعيرة .

ويمكن تعيين نصف قطر الشعيرة عند المقاطع العرضية المختلفة ، وذلك من البعد بين الهدب المتتالية عند موقع كل مقطع عرضي كما هو موضح بالشكل رقم (٢/٧) .



شكل رقم (١/٧) : مقياس تداخل ضوئي لتعيين تضاريس سطح شعيرة باستخدام هدب التداخل الضوئي عند النفاذ



شكل رقم (٢/٧) : شكل هدب التداخل الضوئي المتعدد محددة المواقع ، تظهر على هيئة خطوط مستقيمة حادة مضيئة عند النفاذ وخطوط معتمة عند الانعكاس ، موازية لمحور الشعيرة . يتناقص البعد بين كل هدبتين متجاورتين كلما تحركنا بعيداً عن محور الشعيرة ، طبقاً لانحناء سطح الشعيرة . تمثل الإزاحة A ارتفاعاً على سطح الشعيرة إذ أنها في اتجاه زيادة فجوة مقياس التداخل Δx في حين أن الإزاحة B تنتج من انخفاض على سطح الشعيرة .

٢/٧- تطبيق هذب التداخل الضوئى محددة الموقع عند الانعكاس لدراسة طبغرافية الأسطح

Multiple-beam localised interference systems at reflection applied to surface topography :

طبق « تولانسكى Tolansky » ومجموعته هذب فيزى للتداخل الضوئى المتعدد عند الإنعكاس لفحص أسطح مجموعة متنوعة من البلورات التى تتضمن الميكا والسيلينيت والكوارتز للتعرف على معالم هذه الأسطح ومعالم النمو البلورى لبلورة كريد السيليكون بقياس ارتفاع كل درجة من درجاتها ، وكذلك قياس أبعاد الحفر الناتجة عند أسطح الأجسام لتقدير صلابتها . ويشابه النظام البصرى المستخدم فى هذه الحالة النظام البصرى الذى تم شرحه فى الفصل الرابع فيما عدا تركيب مقياس التداخل الضوئى .

وسندرس الآن تكون مقياس التداخل الضوئى وهو من الأسطح المراد فحصه ومسطح ضوئى مفضض بحيث يمكن - باستخدام ميكروسكوب - رؤية منطقة معينة من السطح وهى فى وضع أفقى بالنسبة للأشعة الساقطة على مقياس التداخل الضوئى . والمكون العلوى لمقياس التداخل الضوئى - كما ذكرنا - هو مسطح ضوئى يواجه الضوء الساقط ويفطى المكون الأول لهذا المقياس ، أى المسطح المراد فحصه - بطبقة سميكة من الفضة ، بينما يغطى المكون الثانى - المسطح الضوئى - بطبقة رقيقة من الفضة انعكاسيتها $R \approx 70\%$ ونفانيتها $T \approx 22\%$. ويضم المكونان مع بعضهما فى حامل jig مناسب ليكونا مقياس تداخل ضوئى يحصر شريحة هواء ، كما فى الشكل رقم (٢/٧) .

ويستخدم ميكروسكوب للملاحظة هذب التداخل الضوئى المتكونة والمحددة الموقع وتكون شبيئية الميكروسكوب لها اتساع زاوى angular aperture مناسب لتجمع كل الأشعة المؤثرة الداخلة فى تكوين الهدف . فإذا كان طول موجة الضوء فى الهواء هو λ فإن الهدف المتكونة تظهر على شكل هذب حادة معمقة على خلفية مضيئة ترسم خريطة تضاريس السطح ، وهى نتيجة تقاطع مستويات توازى المسطح الضوئى الداخلى فى تكوين مقياس التداخل ، ويعد كل مستوى عن مجاوره بمسافة تساوى $\lambda/2$ ، أى أن هذب التداخل التى تظهر هى فى الواقع منعنيات تساوى سمك شريحة الهواء المحصورة بين الأسطح المراد تسجيل تضاريسه والمسطح الضوئى . أى أنها تقع على مستوى وتتكون مجموعة الهدف المغلفة التى لاتتقاطع

عند الارتفاعات والانخفاضات ويختلف البعد بين كل هبة وأخرى . وتعتمد المسافة بين كل هبتين متتاليتين fringe spacing على زاوية ميل مكوى مقياس التداخل الضوئى . وتعين طيفرافية السطح المجهولة كليا بقياس مقدار الإزاحة الجانبية للهبة dx المقابلة للارتفاع h أو الانخفاض على سطح الشعيرة من المعادلة :

$$h = \Delta m (\lambda / 2) \quad (7.1)$$

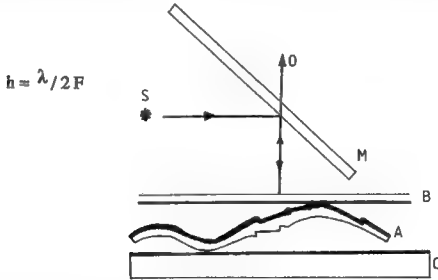
حيث :

$$\Delta m = (dx / \Delta x)$$

و Δx هي المسافة بين هبتين متتاليتين ، كما فى الشكل رقم (٧/٢)

وبذلك يمكن تعيين قيمة h بمعرفة Δm .

وإذا كانت الانعكاسية عالية فإنه يمكن قياس تضاريس السطح ذات الارتفاعات الصغيرة جدا . وإزاحة الهبة التى تساوى نصف عرضها يمكن قياسها بسهولة وهى تقابل



شكل رقم (٧/٢) : مقياس التداخل لتعيين طيفرافية سطح بلورة الميكا وفيه تظهر شريحة من الميكا تم انفلاقها حديثا ومفصّل أحد سطحيها بطبقة سميكة ويمثله فى الشكل A فى حين أن المسطح الضوئى ويمثله B قد غلى بطبقة من القضة نافذة جزئيا للضوء ، وضعا بحيث يحصران شريحة رقيقة من الهواء ، وعند إضاءة المقياس تتكون هيب التداخل المتعدد عند الانعكاس . S يمثل حزمة متوازية من الأشعة وحيدة الطول الموجى و M مجزئ للأشعة ، C علامة ، O فى اتجاه شبيثة الميكروسكوب والكاميرا .

والقيمة λ تساوى ٥٥٠٠ أنجستروم و $F = \text{finesse}$ ، ϵ_0 ، h تساوى ٧٠ أنجستروم تقريباً - Born and Wolf, ١٩٨٠ - ويتحدد شكل السطح وما يميزه من ارتفاعات وانخفاضات بملاحظة اتجاه حركة الذهب عند تغيير المسافة بين مكونى مقياس التداخل الضوئى . وينطبق هذا على النظام البصرى لتكوين هدب التداخل الضوئى عند النفاذ وعند الانعكاس . ففي الحالة الأولى يمكن التفريق بين مرتفع hill ومنخفض valley على السطح باستخدام أكثر من طول موجى . وتعتمد درجة القياسات على جودة quality هدب التداخل الضوئى .

وقد درس "Holden" (١٩٤٩) بعض البارامترات التى تحكم هدب فيزىو للتداخل الضوئى عند الانعكاس ، وبذلك جعل هذه الطريقة مفيدة فى كثير من التطبيقات . وإفاد أنه باستخدام تقطية بطبقة من الفضة انعكاسيتها عالية بينما درجة امتصاصها للضوء قليلة تكون هدب التداخل الضوئى عند الانعكاس أكثر حدة من الهدب المماثلة لها والناجمة من نفاذ الأشعة ، لكن الحد الأدنى للشدة الضوئية عند الانعكاس وتعتمد على امتصاص الطبقة الموجودة على مدخل مقياس التداخل الضوئى التى تواجه الشعاع الساقط . وفى الحقيقة فإن الخصائص الطورية الضوئية optical phase لهذه الطبقة أى قيمة F لها ، حيث :

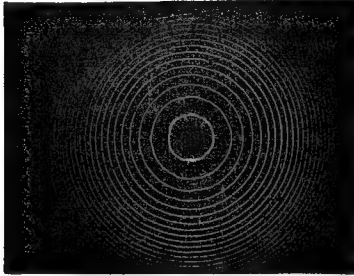
$$F = 2\gamma - (\beta_1 + \beta_2)$$

هى التى تحكم توزيع الشدة الضوئية فى حالة هدب فيزىو للتداخل الضوئى عند الانعكاس - حيث γ هى التغير فى الطور عند نفاذ الأشعة من الطبقة ، β_1 ، β_2 هما التغير فى الطور للأشعة المنعكسة عند السطح الفاصل (الهواء - الطبقة) air-layer ومادة الدعامة أى الخلفية - الطبقة substrate-layer ، كما هو موضح فى الفصل الرابع .

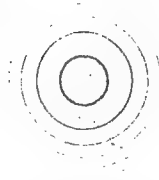
وقد استخدمت هدب التداخل الضوئى المتعدد متساوية الرتبة اللونية multiple-beam fringes of equal chromatic order لفحص طيفغرافية أسطح البلورات - ١٩٦٠ Tolansky ، وتم فى الفصل السادس شرح النظام البصرى المستخدم .

والمقارنة بين نتيجة استخدام هدب التداخل الضوئى المتعدد وهدب التداخل الضوئى الثنائى لتعيين التفاصيل الدقيقة لتضاريس الأسطح يبين الشكلان (٧/١/٤ ، ب) خريطتين

لهذب التداخل الضوئي لسطح كروي من مادة شفافة باستخدام هذب التداخل الضوئي المتعدد النافذة وعند الانعكاس على الترتيب ، بينما يوضح الشكل رقم (٤/٧) الخريطة باستخدام هذب التداخل الضوئي الثنائي . ويتضح من هذه المقارنة أن هذب التداخل الضوئي المتعدد حادة جدا وبقيقة وتكشف عن التفاصيل الدقيقة على سطح الأشياء التي تفقد تماما في حالة استخدام هذب التداخل الضوئي الثنائي .



ج



ب

شكل رقم (٤/٧) : (أ) هذب التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ ، (ب) هذب التداخل الضوئي المتعدد عند الانعكاس ، (ج) هذب التداخل الضوئي الثنائي لنفس السطح الكروي المستخدم في (أ) ، (ب) .

٣/٧- استخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي لدراسة طبغرافية أسطح الألياف

The application of interference microscopy to the study of surface topography.

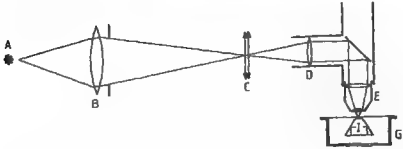
تم استخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي فى دراسة طبغرافية أسطح الألياف النسيجية - Skretchly 1954, Howell and Mazur 1953, Simmens 1954 - وكذلك الألياف البصرية - Barakat et al. 1986 . وفى أحد هذه الدراسات طبق "Skretchly" (١٩٥٤) الطريقة التى طورها تولانسكى Tolansky (١٩٥٢) لدراسة معالم النمو البللورى وذلك لدراسة طبغرافية سطح بعض ألياف الكيراتين Keratin fibres وفى هذه الطريقة الأخيرة تعالج الشعيرات أولاً بمحلول كندابلسم Canda balsam ، المذاب فى البنزين وبعد تجفيف الشعيرات يكون هذا المحلول طبقة رقيقة من هذه المادة . سمعها حوالى ٢ ميكرومتر - على الشعيرات ، ويتبع السطح الداخلى لهذه الطبقة تفاصيل الشكل الخارجى للشعيرة .

وتوضع شعيرة من هذه الألياف على شريحة زجاجية وتثبت من طرفيها بمادة لاصقة . ويستخدم ميكروسكوب وتوضع العينة فى مكانها وتضاء باستخدام ضوء أحادى طول الموجة، وتظهر فى مجال رؤية الميكروسكوب هدب التداخل الضوئى المتكونة بالانعكاس . وتتكون هذه الهدب بالتداخل الضوئى بين الأشعة المنعكسة عند سطحى الكندابلسم ، ويعمل السطح الزجاجى كسطح مرجع . وفى هذه الحالة يستخدم الضوء المنعكس ولا يكون لتأثير الشعيرة كمسة أثر على التداخل الضوئى .

واستخدم " Howell and Mazur " (١٩٥٢) طريقة للحصول على حلقات نيوتن لدراسة مواقع الالتقاء contact areas وتهدف هذه الطريقة إلى دراسة الاحتكاك فى الألياف .

كما وصف " Simmens " (١٩٥٤) طريقة مبسطة تقوم على التداخل الضوئى لفحص تضاريس سطح الألياف والفتائل filaments ، ويبين الشكل رقم (٥/٧) النظام البصرى المستخدم وهو يماثل النظام البصرى المستخدم للحصول على حلقات نيوتن ، وفى

طريقة Simmens يكون التداخل بين الأشعة المنعكسة من الشعيرة ومن سطح مرجع reference plate ، وتظهر الشعيرة محاطة بمجموعة من هدب التداخل الضوئي وهي تمثل منحنيات تساوى الارتفاع مقاسة من المستوى المرجع .



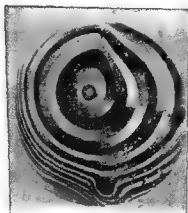
شكل رقم (٥/٧) : النظام البصري المستخدم لفحص طيفرافية أسطح الألياف (Simmens 1954), A, مصدر ضوئي أحادي طول الموجة , B فتحة دائرية وعدسة مجمعة تكون صورة للمصدر على فتحة مستطيلة C, D مجموعة ضوئية تشمل عدسة وسطها عاكسا وعدسة مجمعة , E شبيثة ميكروسكوب , F دعامة , I الشعيرة .

ويلاحظ أنه في جميع النظم البصرية التي تم شرحها في هذا الصدد تتكون هدب تداخل ضوئي محددة المواقع localised fringes قريبة من مقياس التداخل الضوئي - سواء كانت عند النفاذ أو عند الانعكاس أو باستخدام التداخل الضوئي الثنائي أو المتعدد - وتكبر هذه الهدب وتسجل على فيلم حساس وتستخدم شبيثة الميكروسكوب ذات قوة تكبير صغيرة حتى يكون العمق البؤري depth of focus كافيا لتكون الهدب محددة المعالم على امتداد مساحة مناسبة .

وإستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي زايس - لينيك Zeiss-Linnik interference microscope (ZLIM) لتعيين تضاريس سطح الأجسام . وقد أعطيت في الفصل التاسع فكرة تفصيلية عن تركيب هذا الميكروسكوب ومسار الضوء فيه وطريقة تشغيله للحصول على هدب تداخل ضوئي ثنائي ذات درجة تكبير عالية .

وإستخدام «بركات Barakat» (١٩٦١) ميكروسكوب ZLIM لفحص معالم النمو البللوري لسطح بللورة كربيد السيليكون silicon carbide ، ويبين الشكل رقم (٦/٧) خريطة هدب التداخل الضوئي لمعالم النمو البللوري الملونى لأحد أسطح بللورة كربيد السيليكون -

١٩٥٨ Mitchell et al. - وقد تم فى النظام البصري المستخدم الموصول على هذب التداخل على هيئة منحنيات يرسمها الضوء تظهر معالم الحلزون ويعطى الفرق بين الشدة الضوئية عند طبقتى حلزون متتابعتي البعد الفراغى بينهما .



شكل رقم (١/٧) : هذب التداخل الضوئى الثانى التى تحيط بمعالم النمو البالووى التى تظهر على سطح بالورة كروييد السيليكون فى شكل حلزون وذلك باستخدام مقياس التداخل لزايس - لينيك .

واستخدم "Barakat et al" (١٩٨٦) ميكروسكوب التداخل الضوئى زايس - لنيك (ZLIM) لدراسة تضاريس سطح الألياف البصرية المصومة بالانصهار fusion-spliced optical fibres . وتهدف هذه الطريقة إلى مراقبة وفحص جودة عملية اللحام حيث يحتاج نظام التراسل الضوئى إلى استخدام طرق اللحام ووصل الألياف وتعتبر كمية الفقد فى الشدة الضوئية الناتجة من عملية اللحام والوصل عاملا هاما فى تكوين والحفاظ على كفاءة نظام التراسل الضوئى بالألياف البصرية ، حيث إن هذه العملية يمكن أن تؤثر تأثيرا ملحوظا فى الفقد فى وصلات التراسل متعددة الكيلومترات .

وقد اختيرت شعيرة من الألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار GRIN قطر لبها ٥٠ ميكرومتر وقطر قشرتها ١٢٥ ميكرومتر ، واستخدم جهاز اللحام بالانصهار Siecor M67 fusion splicer . وتم فصل الطبقة البلاستيكية الخارجية عند نهايتى الشعيرتين المطلوب لحامهما ، ثم نظفت هاتان النهايتان ، واستخدم قاطع للألياف fibre cutter لإجراء قطع مثالى لهاتين النهايتين . وأجرى انصهار مبدئى لهاتين النهايتين لإزالة الشوائب ثم تقرب من

بعضهما وتلمح . واستخدم ميكروسكوب التداخل الضوئي ZLIM لتعيين تضاريس سطح الألياف بعد لحامها . ويتم التداخل بين الشعاعين المنعكسين أحدهما من مرآة مستوية تستخدم كمرجع reference plane mirror والشعاع الآخر منعكس من سطح الشعيرة المراد فحصها .

وتختار انعكاسية المرآة المرجع بحيث تكون مقاربة لانعكاسية الشعيرة واستخدم مصباح الثاليوم كمصدر ضوئي أحادي اللون ذي طول موجة λ تساوي ٥٢٥ نانومتر . ويوجد أيضا مصباح ضوئي أبيض ليحل محل المصدر أحادي طول الموجة وذلك لتكوين هدب تداخل ضوئي ببيضاء ذات رتبة منخفضة low-order white light fringes وتوضع الشعيرة الملوحة في حامل "Jig" بحيث يكون الجزء المراد فحصه عموديا على الضوء الساقط

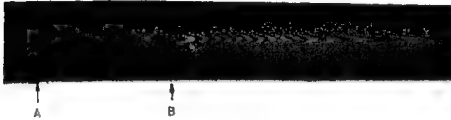
ويبين الشكل رقم (٧/٧) خريطة هدب التداخل الضوئي للجزء الملوحة من شعيرة مندرجة معامل الانكسار GRIN وتم الحصول على هذه الخريطة باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي ZLIM عند الطول الموجي ٥٢٥ نانومتر .

وتظهر مجموعتان من الهدب المغلفة Two-closed fringe systems عند C, B على جانبي نقطة اللحام A نتيجة لتحديب buckling مادة الشعيرة الناتج من عملية اللحام ، ويستنتج ارتفاع هذا التحديب h من المعادلة رقم (١/٧) بمعلومية Δn (عدد هدب التداخل الضوئي المحصورة بين A, B أو المحصورة بين C, A) ويضاف جزء آخر عند مركز الهدب . وكان ارتفاع التحديب عند C, B هما ٦,٧ ، ٢,٩ ميكرومتر على الترتيب بينما تبعد النقطتان C, B عن بعضهما مسافة ٣٠٠ ميكرومتر .

ويبين الشكل رقم (٨/٧) خريطة هدب التداخل الضوئي لجزء من شعيرة ملحوم بداء نقطة اللحام A مروراً بنقطة التحديب عند B وتستمر الخريطة لتغطي الجزء البعيد عن نقطة اللحام unperturbed من الشعيرة ، حيث تظهر الهدب على هيئة خطوط مستقيمة موازية لمحور الشعيرة .



شكل رقم (٧/٧) : هدف التداخل الضوئي لواقع اللحام في شعيرة ضوئية متدرجة معامل انكسار لها
(من Barakat et al. 1986)



شكل رقم (٨/٧) : هدف التداخل الضوئي لواقع انحام لشعيرة ضوئية عند النقطة A ، وتظهر مجموعة من الهدف المظلمة عند النقطة B دلالة على وجود انتفاخ أو تحبيب لمادة الشعيرة عند موقع اللحام
(من Barakat et al. 1986)

وقدم "Barakat et al." (١٩٨٦) في هذا البحث مقارنة بين متوسط الارتفاعات المكونة للتحديبات التي نتجت من عملية اللحام والفقد في شدة الأشعة النافذة المقابل لهذه التحديبات . ونتج عن هذه الدراسة أنه كلما زاد ارتفاع التحبيب يزيد الفقد في شدة هذه الأشعة ، مع الأخذ في الاعتبار أن حجم التحبيب لابد أن يكون في حدود ميكرومتر واحد . وتسمح هدف التداخل الضوئي المستقيمة والموازية لمحور الشعيرة - والمكونة بواسطة الجزء الأسطوانى البعيد عن مناطق اللحام من الشعيرة - تسمح بتعيين قطر الشعيرة (d) على امتداد محور الشعيرة باستخدام المعادلة :

$$d = (D_m^2 / m) \left(\frac{1}{2\lambda} \right) \quad (7.2)$$

حيث D_m هي المسافة بين كل هبتين مستقيمتين لهما نفس الرتبة m ومقسومة على تكبير الصورة وعين قطر الشعيرة من ميل الخط المستقيم الناتج من رسم العلاقة بين m ، D_m^2 . وأعطت قيم قطر الشعيرة المحسوبة بهذه الطريقة درجة بقة تساوى ± 1 ميكرومتر عندما كان قطر الشعيرة حوالى ١٢٦ ميكرومتر .

References

- Barakat N 1961 *Zeiss-Mitteilungen (Heft. FRG.)* **6** 325
- Barakat N, El-Hennawi H A, Medhat M, Sobie M A and El-Diasti F 1986
Appl. Opt. **25** 3466
- Born M and Wolf E 1980 *Principles of Optics* (Oxford : Pergamon) p357
- Holden J 1949 *Proc. Phys. Soc. B* **62** 405
- Howell H G and Mazur J 1953 *J. Textile Inst.* **44** T59
- Mitchell P, Barakat N and El-Shazly E 1958 *Z. Kristallogr.* **III** 1
- Simmens S C 1954 *J. Textile Inst.* **45** T 569
- Skretchly A 1954 *J. Textile Inst.* **45** T 78
- Tolansky S 1984 *Multiple-Beam Interferometry of Surfaces and Films*
(Oxford : Clarendon)
- 1952 *Nature* **170** 4315
- 1960 *Surface Microtopography* (London : Longmans, Green)

الفصل الثامن

تأثير التشعيع على الخواص الضوئية للألياف

The Effect of Irradiation on the Optical Properties of Fibres

يتناول هذا الفصل تأثير التشعيع على الخواص الضوئية للألياف ، ويتضمن قسمين ، القسم الأول (١/٨) يتناول فيه دراسة تأثير أشعة جاما وكذلك التشعيع بالنيوترونات على الخواص الضوئية (الامتصاص الضوئي) للألياف البصرية ، بينما يقدم القسم الثاني (٢/٨) تأثير أشعة جاما على معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف التركيبية والنسجية والبصرية .

١-٨ تأثير التشعيع بأشعة جاما والنيوترونات على امتصاص الألياف البصرية للضوء

The effect of γ and neutron irradiation on the optical absorption of optical fibre waveguides:

عند تعريض ألياف بصرية لإشعاع نووي nuclear radiation فإن امتصاص الألياف للضوء يزيد وهذا الامتصاص المستحث induced absorption يسبب فقدًا مستحثًا induced loss وزيادة في فقد أو اضمحلال الأشعة التي تنقلها هذه الألياف . ويؤخذ في الاعتبار هذا الامتصاص المستحث بالإشعاع عندما تستخدم نظم التراسل الضوئي في جو مشع radiation environments ، وقد أجريت دراسات عديدة للتعرف على سلوك الألياف أثناء وبعد التشعيع لشرح ميكانيكية الفقد المستحث بالإشعاع - Maurer et al., 1973 - وبإنتاج ألياف بصرية قليلة الفقد وبتركيبات جديدة لقشرة ولب الشعيرات أجريت دراسات على تأثير الإشعاع على الألياف من نوع Polymer-clad (Friebele et al. 1978b) silica (PCS) وكذلك الألياف المصنوعة من السيليكا المشابة والألياف البلاستيكية Plastic fibres (Friebele et al. 1978 a) ويمكن دراسة النمو والاضمحلال الناتج من تأثير التشعيع بجرعات من ١ راد إلى ٦١٠ راد .

وتعمل نظم التراسل الضوئى - وخاصة التى تستخدم لمسافات أقل من ٢ كيلومتر - فى منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة near infra-red عند الطول الموجى ٨٥٠ نانومتر ، حيث يستخدم ثنائى باعث الضوء (LED) Light emitting diode ولايزر الحقن injection laser ، ودرست معظم خصائص الألياف قليلة الفقد عند طول الموجة ٨٢٠ ، ميكرومتر . لقد قام "Frieble" ومعاونوه (١٩٧٩) بدراسات عن سلوك الألياف البصرية وخصائصها حول الطول الموجى ١,٣ ميكرون . وقد أظهرت النتائج التى توصلوا إليها عند الطول الموجى ٨٢٠ ، ميكرون ، أن الإلتلاف الذى يحدث فى ألياف PCS يصل إلى التشبع بزيادة الجرعة فيصل الفقد المستحث عند التشبع بجرعات صغيرة إلى أكثر من مائتى ضعف القيمة المتوقعة المحسوبة على أساس جرعات التشبع الكبيرة عند استخدام أطوال قصيرة للألياف البصرية أو الألياف مصممة . كما لوحظ :

١- أن ألياف PCS التى تحتوى على قدر ضئيل من مجموعة الهيدوكسيل OH تكون أكثر قابلية للإلتلاف الناتج من التشبع باستخدام أطوال موجية عند ٨٢٠ ، ميكرون عن ألياف تحتوى على قدر كبير من OH .

٢- حدوث امتصاص انتقالي كبير فى ألياف السليكا المشابة لبها بالجيرمانيم .

٣- أنه قد أظهرت القياسات الطيفية لطيف الامتصاص للألياف فى المدى الطيفى من ٤,٠ الى ١,٠ ميكرون أن الامتصاص المستحث نتيجة الإشعاع يقل عندما تنتقل فى اتجاه الأطوال الموجية الأطول .

واقد أصبح التعرف على خصائص الإلتلاف الناتج من التشبع للألياف التى معامل فقدها ضئيل حول $\lambda = 1,3$ ميكرون ، ضرورة أساسية لنظم التراسل الضوئى التى تستخدم أجهزة ليزر ينبعث عنها أشعة لها هذا الطول الموجى وذلك للانخفاض الملحوظ فى التفرق الضوئى حول هذه القيمة للطول الموجى أى تغير معامل انكسار مادة الألياف البصرية مع الطول الموجى وللتعرف على التفسير الفيزيائى لميكانيكية الإلتلاف الناتج من التشبع المسئول عن الامتصاص المستحث نأخذ نوعين من الإلتلاف :

أ- إتلاف الألياف بتعريضها للأشعة γ . تتفاعل أشعة γ أساسا مع الزجاج ، فيتم إكراه الإلكترونات لتترك مواقعها المألوفة وتحرك خلال شبكية الزجاج . ينتج عن ذلك أولا زيادة في معامل الامتصاص في منطقتي الأشعة فوق البنفسجية والمنظورة والأشعة تحت الحمراء القريبة . وفي عام (١٩٧٤) قام « سيجل وايفانز Sigel & Evans » بدراسة الإتلاف المستحث الناتج بالتشعيع بأشعة γ في الألياف وخلصا إلى أن الفقد المستحث يعتمد أساسا على تركيب الشعيرة ويتغير بين 10^{-4} - 10^{-6} ديسيل لكل كيلومتر لكل راد لألياف مصمتة من ثاني أكسيد السيليكون SiO_2 bulk suprasil ، ديسيل لكل كيلو متر لكل راد للألياف من زجاج Corning عند ٨٠٠٠ أنجستروم . يعني هذا أن مادة السليكا النقية المشهورة بشدة المقاومة للإشعاع في حين أن زجاج Corning رقم ٥٠١٠ له قابلية محسوسة للتغير بالإشعاع .

ب- إتلاف الألياف بتعريضها للنيوترونات . تتفاعل النيوترونات في الأوساط الصلبة أساسا مع النواة - انظر 1975 Shah - لهذا فما يحدث نتيجة التعرض للنيوترونات ليس فقط زيادة في الفقد الناتج عن الامتصاص إنما يحدث أيضا تغيرات تركيبية ينتج عنها تغير في الكثافة وفي معامل الانكسار ، وقوة دوران rotary مستوى الاستقطاب للأشعة ، والانكسار المزدوج والوصلية الحرارية .

وفي عام (١٩٧٣) قام « موريير Maurer et al » ومعاونوه بتشعيع ألياف متعددة المنوال مصنوعة من زجاج السليكا بحزمة من النيوترونات ١٤ مليون إلكترون فولت مستخدمين جرعات كبيرة تصل إلى 1.4×10^{12} نيوترون لكل سم^٢ . وقد أفادت النتائج بأن الفقد المستحث من التشعيع بالنيوترونات يتغير خطيا تقريبا مع الجرعة الكلية وأن قيمته تكون أقل من 1.5×10^{-11} ديسيل لكل كيلو متر لكل نيوترون لكل سم^٢ في المدى من ٨٠٠٠ إلى ١٢٠٠٠ أنجستروم .

والحصول على قياسات طيفية ثابتة Permanent وتمتجر كمرجع استخدم « فريبيل Friebele et al » ومعاونوه عام (١٩٧٩) أليافا بصرية طولها من ١٠-٣٠ مترا تم تشعيعها بمصدر كوكيت ٦٠ ينبعث منه 10^6 راد (سليكون) وقيس الامتصاص الضوئي في

الذى الطيفى من ٠.٤ إلى ١.٧ ميكرون قبل التشعيع وبعد انقضاء ساعة واحدة. كما تم تعريض شعيرة بصرية طولها متر واحد لمدة ٢ نانوثانية ، ٢٧٠٠ راد لحزمة من ٠.٥ مليون الكترون فولت الكترونيات نبضية . وكانت الألياف التى استخدمها قرييل ومعاونوه من النوع متدرج معامل انكسار ليه ، كما حصلوا على نتائج مماثلة باستخدام الألياف بصرية ثابت معامل انكسار ليه . وقد دلت نتائج تجاربهم على أنه بالإضافة الى حدوث أشربة امتصاص عريضة فى منطقتى الأشعة فوق البنفسجية وتحت الحمراء فقد سجلت زيادة فى الشدة فى شرائط الهيدروكسيل OH وشرط Combination عند ٠.٩٥ ، ١.٢٢ ، ١.٣ ميكرون .

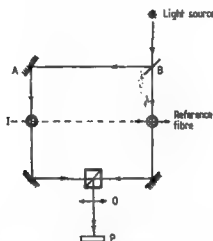
٢/٨- تأثير التشعيع بأشعة جاما على قيمة معاملات الانكسار والانكسار المزوج للألياف البصرية والألياف النسيجية التركيبية

The effect of γ irradiation on the refractive indices and birefringence of optical and synthetic textile Fibres :

طبق « برتولوتى Bertolotti et al » ومعاونوه (١٩٨٠ ، ١٩٧٩) طريقة التداخل الضوئى الثانى لدراسة التغيرات الصغيرة فى معاملات الانكسار للألياف البصرية بعد تعريضها لأشعة جاما . واستنتجوا أنه تطرأ تغيرات محسوسة على كل من معاملات الانكسار وأبعاد الألياف البصرية حتى باستخدام جرعات منخفضة نسبيا من أشعة جاما (راد واحد مثلا) . وزيادة على ذلك فإن هذه التأثيرات تختفى عند درجة الحرارة العادية خلال عدة أيام . وفيما يلى نشرح الطريقة التى استخدمها برتولوتى ومجموعته .

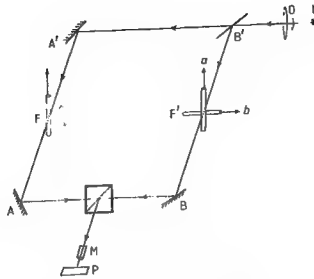
يبين الشكل رقم (١/٨) النظام البصرى لميكروسكوب التداخل الضوئى الثانى لماخ وزندر Mach-Zehender interferometer الذى يسمح بتكوين هذب التداخل الضوئى الناتج من الشعاع الذى يعبر الشعيرة الموضوعة فى الذراع A لقياس التداخل الضوئى وشعاع آخر مرجع يمر خلال الذراع B الذى يحتوى على عينة من شعيرة عيارية . ومقياس التداخل الضوئى الموضح فى الشكل رقم (١/٨) هو أحادى المسار . وتضبط صورة واضحة لهذب التداخل الضوئى على الفيلم الحساس P باستخدام المكون البصرى O . لقد

استخدمت هذه الطريقة لتحديد التغيرات التي تطرأ على معاملات انكسار الألياف البصرية (STEP) للضوء ، وكذلك التغيرات في أبعاد هذه الألياف بعد تشعيمها بجرعة إشعاعية مقدارها كيلوراد واحد من أشعة جاما ناتجة من مصدر كوبالت ^{60}Co . وسجل برتولوتي ومجموعته تغيرات نسبية في أنصاف أقطار لب وقشرة الشعيرات تصل قيمتها ٩ ، ٣ ، ٨ ، ١٪ على الترتيب ، وتغيرات في معاملات انكسار لب وقشرة الشعيرات بمقدار ٨ ، ٢ ، ٢٦٪ على الترتيب .



شكل رقم (١/٨) : نظام تداخل ضوئي ثنائي مستخدم لدراسة التغيرات الضخية في معامل انكسار الألياف البصرية المشعة بإشعاع γ (من Bertolotti et al 1980 b)

كما قدم "Bertolotti et al" (١٩٨٠ a) وصفا لطريقة مفيدة وهي طريقة التداخل الضوئي بالطرح Subtraction interferometric method ، وذلك لتحديد التغيرات الصغيرة التي تطرأ على معاملات انكسار وأبعاد الألياف البصرية ، ويوضح الشكل رقم (٢/٨) النظام البصري المستخدم في هذه الطريقة . فتوضع شعيرتان في ذراعى مقياس ماخ ويزنر Mac-Zehender interferometer على أن يكون محوراها متوازيين في الوضع (a) متعامدين في الوضع (b) .



شكل رقم (٧/أ) : رسم تخطيطي للنظام البصري لطريقة التداخل الضوئي بالطرح عند تطبيقها على الألياف البصرية . L مصدر ضوئي ، AA' ، BB' مكونات مقياس التداخل الثاني لماخ و زندر . M ميكروسكوب ، P لوح فوتوغرافي . توضع الشعيرتان في ذراعي المقياس على أن يكون محوراها متوازيين في الوضع a ومتعامدين في الوضع (b)

إزاحة هذب التداخل الضوئي عند تطبيق طريقة التداخل الضوئي بالطرح على الألياف

Expressions for the fringes shift in subtraction interferometry of fibres :

سندرس حالة التداخل الضوئي بالطرح بين عيقتين من نفس الشعيرة ، أحدهما تعمل كمرجع والأخرى مشعة والمطلوب تعيين تأثير التشعيع على كل من أبعاد ومعاملات انكسار الشعيرة . توضع العيقتان في ذراعي مقياس التداخل الضوئي لماخ و زندر ، على أن يكون محوراها متوازيين أو متعامدين ، كما في الشكل رقم (٧/أ) وفي كلتا الحالتين فإن فرق طول المسار الضوئي (OPL) بين المرأتين AA' والمرأتين BB' تعطيه المعادلة :

$$\Delta = \int_A^{A'} ndx - \int_B^{B'} ndx$$

وباعتبار أن التغير في معاملات الانكسار يكون صغيرا وأن الشعيرة عبارة عن جسم يغير من طور الأشعة phase object فإن Δ تظهر كإزاحة في الهدبة .

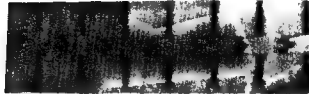
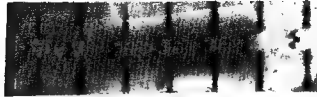
٨/٢-١ تأثير أشعة جاما على معاملات الانكسار والانكسار المزدوج

للألياف النسيج التركيبية

Effect of γ irradiation on the refractive indices and birefringence of textile synthetic fibres :

طبق "Hamza et al" (١٩٨٦) هدب فيزيو للتداخل الضوئي لدراسة تأثير أشعة جاما على بعض الخواص الضوئية للألياف التركيبية . وأجريت عملية التشميع في الهواء . واستخدم "Hamza and Mabrouk" (١٩٨٨) هدب التداخل الضوئي المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس لتحديد معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف الدراون Dralon المشعة بأشعة جاما . وأجريت التشميع عند ضغط منخفض (10^{-4} تور) ، حيث وضعت العينات في أنبوبة اختبار تفلق بعد إجراء عملية التفريغ والوصول إلى قيمة هذا الضغط المنخفض . وعرضت لأشعة جاما من مصدر كويك Co 60 . وأجريت عملية التشميع لأزمنة مختلفة من ٩٦ إلى ٥٧٣ ساعة ، وكان معدل الجرعة الإشعاعية هو $23,71 \pm 0,27$ راد / ثانية . ويبين الشكل رقم (٨/٣) ، (ب) هدب التداخل الضوئي المتعدد لفيزيو عند الانعكاس عندما تعبر شعيرة من ألياف الدراون المشعة بجرعة إشعاعية مقدارها $22,059$ ميغاراد ، وذلك باستخدام ضوء أحادي طول الموجة ($\lambda = 46,1$ نانومتر) (أ) مستقطبا في المستوى العمودي على محور الشعيرة (ب) في الاتجاه الموازي لمحور الشعيرة ، ويمكن حساب معامل الانكسار المتوسط للشعيرة من المعادلة :

$$n_a = n_L + \frac{F \lambda}{2A h}$$



ب

شكل رقم (٢/أ) : هدب التداخل الممتد للفيوز عند الانعكاس عبر ألياف درالون بعد تشعيعها بأشعة γ بجرعة ٥٩, ٢٢ ميغاراد عندما تكون الأشعة وحيدة الطول الموجى مستقطبة فى مستوى وتتجذب موازية (a) وعمودية (b) على محور الشعيرة (من Hamza and Mabrouk)

كما هو موضح فى الفصل السادس - حيث A هى مساحة مقطع الشعيرة ، h هى المسافة بين كل هديتين متتاليتين فى منطقة سائل الغمر ، F هى المساحة المحصورة تحت إزاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة .

ويمكن ملاحظة أن هذه المساحة أكبر فى الصورة (٨/٤/ب) عنها فى الصورة (٨/٤/أ) ، يدل ذلك على أن قيمة n_a^\perp أكبر من قيمة n_a^\parallel عند نفس الجرعة الإشعاعية . والقيم المقاسة لهذا النوع من الألياف بعد تشعيعها هى :

$$n_a^\parallel = 1.5178, n_a^\perp = 1.5202 \text{ and } \Delta n_a = -2.4 \times 10^{-3}$$

ويبين الشكل رقم (٨/٤/أ، ب) هدب فيوز للتداخل الضوئى عند النفاذ حيث تعبر شعيرة من ألياف الدرالون مشعة بأشعة جاما وبجرعة إشعاعية مقدارها ١٤٧, ٤٩ ميغاراد ، وذلك باستخدام ضوء أحادى طول الموجة ($\lambda = ٥٤٦,١$ نانومتر) مستقطبا فى المستوى العمودى على محور الشعيرة وفى الاتجاه العمودى عليه على الترتيب . ويمكن من الشكلين

(٣/٨) ، (٤/٨) ملاحظة أن المساحة F المحصورة تحت إزاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة تزيد بزيادة الجرعة الإشعاعية .

واقترح "Hamza and Mabrouk" صيغ وضعية empirical formulac للعلاقة بين معامل الانكسار والجرعة الإشعاعية (r) وكذلك للعلاقة بين معامل الانكسار المزدوج والجرعة الإشعاعية وذلك في المدى من صفر إلى ١٤٧, ٤٩ ميجاراد كالآتي :

$$n_a = n_0 \exp (ar^{1/3})$$

حيث :

$$n_o^{\parallel} = 1.5122 \quad \text{and} \quad a = 1.344 \times 10^{-5} \text{ rad}^{-1/3} \text{ for } n_a^{\parallel} \text{ and}$$

$$n_o^{\perp} = 1.5164 \text{ and } a = 9.08 \times 10^{-6} \text{ rad}^{-1/3} \text{ for } n_a^{\perp}$$

وبالنسبة لمعامل الانكسار المزدوج اقترحت المعادلة :

$$\Delta n_a = \Delta n_0 \exp (-ar^{1/2})$$

حيث :

$$\Delta n_0 = -4.2 \times 10^{-3} \text{ and } a = 1.285 \times 10^{-4} \text{ rad}^{-1/2}$$

وفي حالة ألياف الدرلون المشععة بأشعة جاما في الهواء طبقت نفس المعادلات ولكن باستخدام القيم الآتية :

$$n_o^{\parallel} = 1.5120 \text{ and } a = 2.03 \times 10^{-5} \text{ rad}^{-1/3} \text{ for } n_a^{\parallel}, \text{ and}$$

$$n_o^{\perp} = 1.5162 \text{ and } a = 1.62 \times 10^{-5} \text{ rad}^{-1/3} \text{ for } n_a^{\perp}$$



شكل رقم (٤/٨) : هيب التداخل المتعمد لفيوز عند النفاذ عبر شعيرة من ألياف الدراون بعد تشعيمها
بأشعة γ بجرعة ١٤٧ , ٤٩ ميجاراد عندما تكون الأشعة المستخدمة وحيدة الطول الموجي مستقطبة في
مستوى وتتنذب موازية (a) وعمودية (b) على محور الشعيرة (من Hamza and Mabrouk, 1988)

وطبق "Barakat et al" (١٩٨٩) هيب التداخل الضوئي لفيوز عند النفاذ لتعيين معاملات
الانكسار (n_F^{\parallel} , n_F^{\perp}) والانكسار المزدوج لألياف الكاشميليون Cashmilone المشعة بأشعة
جاما . فعند استخدام ضوء أحادي طول الموجة ($\lambda = ٤٦,١$ نانومتر) وجدت القيمة الآتية
قبل التشعيع :

$$n_F^{\parallel} = 1.5118, n_F^{\perp} = 1.5145 \text{ and } \Delta n_F \approx -0.0026$$

واستنتجوا أن الانكسار المزدوج يقل بزيادة الجرعة الإشعاعية r ، وأن المنحنين بين r ،
 n_F^{\parallel} وبين r ، n_F^{\perp} يلتقيان عند جرعة إشعاعية مقدارها ١٨٥ ميجاراد . يدل ذلك على أن
سلوك الألياف المشعة بتلك الجرعة يقارب سلوك الألياف متماثلة الخواص
الضوئية isotropic ، و بزيادة الجرعة الإشعاعية يبعد المنحنيان عن بعضهما ولكن بإشارة
مختلفة لقيمة الانكسار المزدوج ، وتكون n_F^{\parallel} اكبر من n_F^{\perp} .

References

- Barakat N, El-Hennawi H A, El-Okr M and Sharaf F 1989 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **22** 786
- Bertolotti M, Ferrari A and Scudieri F 1979 *Radiat. Eff. Lett.* **43** 177
- 1980a *Opt. Acta* **27** 1143
- Bertolotti M, Ferrari A, Scudieri F and Serra A 1980b *Appl. Opt.* **19** 1501
- Friebele E J, Gingerich M E and Sigel Jr G H 1978a *Appl. Lett.* **32** 619
- Friebele E J, Sigel Jr G H and Gingerich M E 1979 *Fibre optics* ed. B Bendow and S Mitra (London : Plenum) p355
- Friebele E J, Sigel Jr G H, Jaeger R E and Gingerich M E 1978b *Appl. Phys. Lett.* **32** 95
- Hamza A A, Ghander A M, Oraby A H, Mabrouk M A and Guthrie J T 1986 *J. Phys. D Appl. Phys.* **19** 2443
- Hamza A A and Mabrouk M A 1988 *Radiat. Phys. Chem.* **32** 654
- Maurer R D, Schiel E J, Kronenberg S and Lux R A 1973 *Appl. Opt.* **12** 2023
- Shah J 1975 *Bell Syst. Tech. J* **54** 1208
- Sigel Jr G H and Evans B D 1974 *Appl. Phys. Lett.* **24** 410

الفصل التاسع

ميكروسكوبات التداخل الضوئى

Interference Microscopes

ميكروسكوبات التداخل الضوئى هى ميكروسكوبات معدلة يمكن بواسطتها رؤية الجسم (المعتم أو الشفاف) وفى نفس الوقت تحتوى على مقياس تداخل ضوئى (Tolansky 1973). ويعنى هذا أن ميكروسكوب التداخل الضوئى يحتوى على الميكروسكوب الضوئى ومقياس التداخل فى جهاز واحد يعمل عمل كل منهما . ويسمح هذا التعديل بالحصول على معلومات مفيدة بالإضافة إلى ما يتم الحصول عليه باستخدام الميكروسكوب الضوئى التقليدى . ويوجد عدد من مقاييس التداخل الضوئى Optical interferometers التى يمكن أن تلتحق بالميكروسكوب الضوئى ويتوفر عند هذه الميكروسكوبات على المستوى التجارى .

١/٦- أساسيات ميكروسكوب التداخل الضوئى

Fundamentals of interference microscopy

تنقسم الأجسام بالنسبة للميكروسكوب الضوئى إلى أجسام تحدث تغيراً فى سعة الموجة amplitude objects ، وأجسام تحدث تغيراً فى طور الموجة phase objects . وفى الحالة الأولى يختلف امتصاص الأجسام للضوء عن امتصاص الوسط المحيط بالجسم لهذا الضوء ، وبذلك يظهر تباين بين الجسم والوسط المحيط به تسجله عين الإنسان وأفلام التصوير لحساسيتيهما للتغير فى الشدة الضوئية ، والأجسام التى تغير من طور الموجة phase objects لها أهمية خاصة فى حالة ميكروسكوبات التداخل الضوئى ، ولاتعطى هذه الأجسام تغيراً فى شدة الضوء المتحصن إنما تحدث اختلافاً من الوسط المحيط بها لاختلاف معاملات الانكسار أو السمك الضوئى (nt) ، حيث n هى معامل انكسار الجسم ، t هى سمكه بوحدة الأطوال . ويوضع الجسم الذى يغير من طور الموجة فى مقياس التداخل الضوئى فيغير من طول المسار الضوئى خلال هذا الجسم . ويبين الشكل رقم (١/٦) فكرة ميكروسكوب التداخل الضوئى الثانى - Françon 1961 .

وينقسم الشعاع الضوئي SM إلى شعاعين MBN, MON عند النقطة M بأحد عناصر مقياس التداخل الضوئي . ويمر الشعاع MON خلال الجسم O (phase object) . ويمكن أن يكون هذا الجسم عبارة عن شعييرة . ولا يمر الشعاع MBN بالجسم O ولتقى الشعاعان مرة أخرى عند النقطة N بواسطة العنصر الآخر من عناصر مقياس التداخل الضوئي وتمر الأشعة بالميكروسكوب وتنتج هدب التداخل الضوئي . وتحدد نتيجة التداخل الضوئي بين الشعاعين MBN, MON شدة الشعاع NS وتعتمد على معامل الانكسار وسمك الجسم O .

وبفرق الطور δ بين الموجتين W_1, W_2 يساوى $\Delta \frac{2\pi}{\lambda}$ ، حيث Δ هي فرق المسار، ويمكن بهذا باستخدام مقياس التداخل الضوئي . والعلاقة الآتية تعطى توزيع الشدة الضوئية في الهدب الناتجة بدلالة فرق الطور δ :

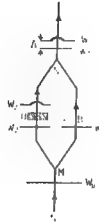
$$I = I_0 \cos^2 \delta / 2$$

$$= I_0 \cos^2 \frac{\pi}{\lambda} \Delta$$

فنعلم أن تكون Δ تساوى صفرا فإن δ تساوى صفرا ويكون $I = I_0$.

ويتضح أن الموجتين يكون لهما نفس الطور في جميع المناطق ماعدا المناطق التي حدث لها تغير بواسطة الجسم phase object . وفي حالة هدب التداخل الضوئي الثنائي تتبع توزيع الشدة الضوئية قانون مربع جيب التمام \cos^2 law . وتكون عرض الهدب المضيق مساويا لعرض الهدب المعتمة وتساوى نصف المسافة بين هدبتين مضيقتين متتاليتين . وعندما يتغير طور الموجة δ خلال الأجزاء التي حدث لها تغير بواسطة الجسم تتغير الشدة الضوئية الناتجة ، وتعطى معلومات عن قيمة ومدى تغير السمك الضوئي optical thickness للجسم بغير الطور phasor وإذا كانت قيمة Δ صغيرة تكون رتبة التداخل N صغيرة وتساوى صفرا أو ١ أو ٢ ، وتظهر هدب تداخل ضوئي ملونة عندما يضاء مقياس التداخل الضوئي بمصدر ضوئي أبيض .

نذكر هنا أنه قد تم في الفصل السادس شرح أساسيات هيب التداخل الضوئي المتعدد وتطبيقها على الألياف .



شكل رقم (١/٩) : أساس ميكروسكوب التداخل الضوئي الثاني وتظهر جبهات الموجات الناتجة

وتتقسم أنواع ميكروسكوبات التداخل الضوئي إلى مجموعتين :

أ- المجموعة التي تستخدم الضوء المنعكس أى التي تتعامل مع أجسام معتمة غير منقذة للضوء مثل المعادن .

ب- المجموعة التي تستخدم الضوء النافذ خلال الأجسام ، أى التي تتعامل مع الأجسام الشفافة التي تسمح بنفاذ ضوء من خلالها مثل الألياف والمواد البيولوجية biological materials .

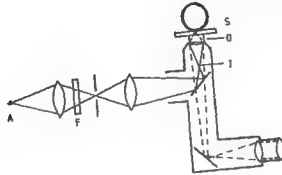
وتعطى المجموعة (أ) معلومات عن تضاريس سطح الأجسام ، بينما تعطى المجموعة (ب) معلومات عن تركيب العينات sample structure وعن قيمة $n \lambda t$ عند أى نقطة على العينة . وإذا قيس سمك العينة (بالمليمتر مثلاً) فإنه يمكن تعيين معامل الانكسار . وميكروسكوب التداخل الضوئي قوة تكبير عالية high magnification يصاحبها قوة تحليل كبيرة high resolution فقط في حالة البعد الرأسي أى العمق (Tolansky 1973) .

والشكلان الآتيان يعطيان وصفاً لميكروسكوبين كمثالين للنظام البصري المستخدم في المجموعتين أ ، ب .

١- ميكروسكوب التداخل الضوئي بالأشعة المنعكسة

Interference microscopes using reflected light :

طور « تولانسكى ، Tolansky » (١٩٤٤) نظاما مبسوطا فى حالتى التداخل الضوئى الثنائى والمتعدد - انظر : Tolansky, 1973 - ونلاحظ فى الشكل رقم (٢/٩) أن الضوء يخرج من المصدر A يمر من خلال المرشح الضوئى F ويتكون صورة I فى المستوى البؤرى للعدسة الشيئية O . وتمثل S نظام التداخل الضوئى الذى يتكون من الجسم موضوعا على مسطح ضوئى . ويضاء هذا النظام بسقوط حزمة متوازية من الضوء أحادى اللون عموديا عليه . ويظهر سطح الجسم مغطى بهذب التداخل الضوئى ، ويمكن الحصول على خريطة هذه الهذب بارتفاعات تتغير بمقدار $\lambda/2$ (حيث λ هى طول موجة الضوء المستخدم) عندما تنتقل من هلبة إلى الهلبة التالية .



شكل رقم (٢/٩) : ميكروسكوب التداخل الضوئى الذى يستخدم أشعة منعكسة (من Tolansky 1973)

٢- ميكروسكوب التداخل الضوئى الذى يستخدم الأشعة النافذة

Interference microscopes using transmitted light

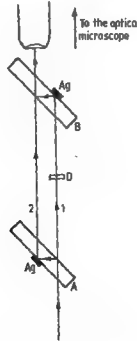
تفحص الأجسام الشفافة المنقذة للضوء مثل الألياف التركيبية والألياف البصرية بواسطة الأشعة النافذة . ويوجد عدد كبير من ميكروسكوبات التداخل الضوئى التى تستعمل الضوء النافذ ، وقد قسم « تولانسكى Tolansky » (١٩٧٣) هذه الأجهزة إلى :

أ- أجهزة تستخدم ميكروسكوبين .

- ب- أجهزة تستخدم ميكروسكوب مطور modified microscope .
- ج- العدسة الشيئية المحتوية على مقياس تداخل ضوئي interference objectives .
- د- مقاييس التداخل الضوئي التفاضلية differential interferometers .
- وقد أعطى تولانسكى وصفا لبعض الأجهزة الممثلة لهذه الأنواع الأربعة من ميكروسكوبات التداخل الضوئي .

ووصف " Sirks " فى عام (١٨٩٣) واحدا من أوائل ميكروسكوبات التداخل الضوئي التي تستخدم الأشعة النافذة . ويتكون هذا الميكروسكوب من مقياس التداخل الضوئي لجامان Jamin interferometer الذي يوضع قبل الميكروسكوب الضوئي - انظر Tolansky, 1973 - وبين الشكل رقم (٣/٩) رسما توضيحيا لهذا الجهاز حيث B, A عبارة عن لوحين متماثلين من الزجاج يحتوى كل منهما على منطقة صغيرة مفضضة .

وتتقسم الحزمة الضوئية المتوازية إلى شعاعين ١ ، ٢ كما فى الشكل رقم (٣/٩) ، ويمر أحدهما خلال الجسم O بينما يمر الشعاع الآخر بالقرب من هذا الجسم ، وينتج عن ذلك وجود فرق فى المسار الضوئي . وبالمارور خلال B يتداخل الشعاعان وينتج هيب تداخل ضوئي يمكن رؤيتها بالميكروسكوب ، وتعطى هذه الهيب معلومات عن الجسم O .



شكل رقم (٣/٩) : ميكروسكوب التداخل الضوئي لجامان (تولانسكى ١٩٧٣)

والحصول على معلومات أكثر عن أساسيات ميكروسكوبات التداخل الضوئي وتطبيقاتها
في بحوث الألياف نقترح الرجوع إلى المراجع الآتية :

Tolansky (1948, 1973), Françon (1961), Heyn (1954, 1957), Barer (1955), Stoves (1957), Pluta (1971, 1972, 1982), Fatou (1978), Steel (1986) and Hamza (1986).

ونذكر في القسم التالي وصفا لبعض ميكروسكوبات التداخل الضوئي الثنائي ، وكذلك
بعض الأنظمة البصرية التي تستخدم في مجال دراسة الألياف بالتداخل الضوئي fibre
. interferometry

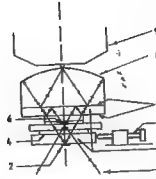
٢/٩- بعض أنواع ميكروسكوبات التداخل الضوئي :

Some types interference microscope

١/٢/٩- ميكروسكوب التداخل الضوئي لدايسون

The Dyson interference Microscope :

في هذا الميكروسكوب - Dyson 1950, 1953 - يسقط الضوء بواسطة عينة مجمعة
حيث يتم اعتراضه بشريحة ذات سطحين متوازيين ، سطحها العلوي مغطى بطبقة رقيقة من
الفضة ينفذ من خلالها الضوء ليسقط جزء منه على الجسم وينعكس جزء آخر مرتين لوجود
منطقة مغطاة بالفضة (2) ، وذلك يمر شعاعان بالمستوى الموجود به الجسم ، أحدهما من
خلاله والآخر لا يمر بالجسم ويعتبر كمرجع . ويبين الشكل رقم (٤/٩) النظام البصري
لميكروسكوب التداخل الضوئي لدايسون - Dyson, 1950 .



شكل رقم (٤/٩) : النظام البصري لميكروسكوب التداخل الضوئي لدايسون (من Dyson 1950)

- 1- مخروط حزمة الأشعة الضوئية الساقطة على الجسم (6) بواسطة العدسة المجمعة
- 2- منطقة مقطاة بطبقة من الفضة تمكس الضوء
- 3- شريحة من الزجاج سطحاها متوازيان
- 4- سطح نصف مقعّض
- 5- مسمار محوٍ يقوم بتحريك الشريحة (3)
- 6 - الجسم تحت النقص
- 7- سطح نصف مقعّض
- 8- سطح مغلي بطبقة سميكة من الفضة
- 9- شبيثة الميكروسكوب

٢/٢/٩- ميكروسكوب التداخل الضوئي لبيكر :

Baker interference microscope

تم تطوير هذا الميكروسكوب عام (١٩٥٠) وهو ميكروسكوب تداخل ضوئي يقوم على الانكسار المزدوج . وقد ناقش " Heyn " (١٩٥٧) استخدامه في دراسة الألياف النسيجية . وفيه ينفصل الشعاع الضوئي إلى شعاعين : الشعاع المعتاد ordinary ray ، والشعاع الشاذ extra ordinary . وذلك باستخدام مجزئ حزمة الأشعة beam splitter ، مكون من بلورة تحدث انكسارا مزدوجا ، ويكون الشعاعان مستقيطين في مستويين متعامدين . ويمر هذان الشعاعان في الأجزاء المختلفة من الجسم . ويمكن قياس معامل انكسار الألياف بسهولة باستخدام هذا الميكروسكوب .

٣/٢/٩- ميكروسكوب التداخل الضوئي « انترفاكو »

The " Interphako " interference microscope

يعتبر هذا الجهاز مناسباً لقياس الفروق الصغيرة في المسار الضوئي في العينات الميكروسكوبية ، ويمكن استخدام عدة طرق تقوم على التداخل الضوئي لدراسة وقياس

الخواص الضوئية للعينات بهذا الجهاز . ففي حالة استخدامه بطريقة الأشعة النافذة (*) يتكون الانتزفاكو من :

أ- ميكروسكوب ضوئي عادي يستخدم الأشعة النافذة خلال الجسم المراد فحصه .

ب- نظام داخلي وسيط لتكوين الصورة .

ج- مقياس ماخ ونذر للتداخل الضوئي .

ويبين الشكل رقم (٥/٩) مسار الأشعة في ميكروسكوب الانتزفاكو -Beyer and Schöppe, 1965 - حيث تغشاء الفتحة S_p بالمصدر الضوئي S . وبمساعدة العدسة المجمعة (1) والعدسة الشيئية (2) تتكون صورة للفتحة S_p في المستوى البؤري للعدسة الشيئية عند S_p' . ويكون النظام الداخلي لتكوين الصورة (3,4,5) صورة مرحلية intermediate للجسم O عند O' , كما يكون صورة لفتحة الخروج للميكروسكوب exit pupil عند S_p'' في مقياس التداخل الضوئي . ويستخدم المنشور (4) لوضع صورة لفتحة (exit pupil) S_p'' في مكانها الصحيح . ويستخدم المنشور (12) في عملية التصوير . أما العدسة (13) وهي من نوع معين Bertrand lens فتستخدم في رؤية الفتحة .

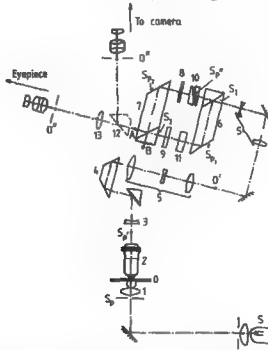
ويتكون مقياس التداخل الضوئي في هذا الجهاز من منشورين (7 & 6) ، ومغير لطور الأشعة (8) Phase shifter ، وإسفين ضوئي دوار (10) rotary wedge بالإضافة إلى عنصرين (٩) ، (١١) يتم عن طريقهما تعادل الأشعة compensating elements .

ويخرج الشعاعان المتكونان عند سطح مجزئ الشعاع S_1 من فتحتي الخروج exits ، والنقطتان B,A من المنشور (7) يقابلان بعضهما تماما من ناحية الارتفاع والاتجاه . ويحدث مغير الطور (8) phase shifter فرقا في المسار بين $S_1 S_{p1}$, $S_2 S_{p2}$ بالمقدار $\pm 15\lambda$ (حيث λ هي طول موجة الضوء وتساوي ٥٠٠ نانومتر) وذلك كحد أعلى . ويمكن قياس فرق المسار حتى ثلاثين رتبة . ويتكون الإسفين الضوئي

(*) See Description and Instruction Manual, Carl Zeiss Jena, Brochure No 30-G305-2.

النوار (10) rotary wedge من إسفينين من الزجاج المتماثلين في الشكل والتصميم ويدوران حول المحور البصري في اتجاهين متضادين ويمكن استخدام الانترفاكو في قياس الأجسام المناسبة بدقة تصل إلى $\lambda/200$ بدون استخدام شريحة نصف مظلة half-shade plate ، وتصل هذه البقة إلى $\lambda/500$ باستخدام هذه الشريحة .

واستخدم "Hamza, 1986 and Hamza et al 1986" جهاز الانترفاكو لقياس معاملات الانكسار المتوسطة والانكسار المزوج لألياف البولي استر والياف المركب المزوج المتكون من غلاف sheath من النايلون ٦ وب core من النايلون ٦٦ . وتم استخدام كل من الضوء الأبيض والضوء أحادي طول الموجة .



شكل رقم (٥/٩) : مسار الأشعة في ميكروسكوب التداخل الانترفاكو (من) Description and
 S (Instructions Manual Carl Zeiss Jena, Brochure No 30-G305-2) مصدر
 ضوئي S_p فتحة ، O الجسم ، (1) عدسة مجمعة (2) شينية (3)، (4)، (5) نظام تكوين الصورة
 المرحلية (6)، (7)، منشوران ، (8) مغير طور الأشعة (9)، (11) عنصران يتم عن طريقهما تعادل
 الأشعة (10) الإسفين النوار (12) منشور (13) عدسة بتراند

١/٢-٤ - ميكروسكوب التداخل الضوئي لبلوتا

The Pluta polarising interference microscope

طور « بلوتا Pluta » (١٩٦٥ ، ١٩٧١ ، ١٩٧٢) ميكروسكوب تداخل ضوئي مستخدماً الانكسار المزدوج ، ويتميز بكمية واتجاه متغيرين من الـ wavefront shear ووصف استخدام هذا الميكروسكوب لدراسة الألياف التركيبية . وقدم بلوتا بعض التحسينات في قياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف باستخدام التداخل الضوئي ، ويوفر هذا الميكروسكوب مجالين :

أ- مجالاً متجانساً للرؤية uniform field .

ب- مجالاً يحتوى على هيب التداخل الضوئي fringe interference field مع ازدواج جانبي للصورة ، ويستخدم لكل من التحليل الكيفي باستخدام طريقة التباين التفاضلي لهدب التداخل (DIC) differential interference contrast والتحليل الكمي ، وذلك بقياس فرق المسار الضوئي للعينات المختلفة المنقذة للضوء .

ولميكروسكوب التداخل الضوئي التقليدي استخدامات محدودة في مجال دراسة الألياف . بينما تتميز ميكروسكوبات التباين التفاضلي لهدب التداخل (DIC) (1955) Nomarski بمميزات كثيرة في هذا المجال . وسنشرح فيما يلي الفكرة التي بنى عليها ميكروسكوب بلوتا ، ويبين الشكل رقم (١/٦) المسار الضوئي لميكروسكوب التداخل الضوئي بالانكسار المتغير (VDRI) variable double-refracting interference الذي طوره « بلوتا Pluta » (١٩٧١ ، ١٩٧٢) تمثل Z المصدر الضوئي Kol مجمع الضوء D_p illuminator collector فتحة diaphragm ، ومن أهم الصفات الميزة لهذا النظام البصري احتواؤه على منشورين للانكسار المزدوج birefringent prisms W₁ & W₂ يعملان في نفس الوقت ويفصل بينهما لوح نصف موجي (H) half wave plate ، وهذان المنشوران هما من نوع منشورات والاستون Wollaston prisms - انظر Nomarski, 1955 - والمصنوعة من بلورة الكوارتز .

ويتضح من الرسم أن المنشور W_1 موضوع خلف العدسة الشيئية ob وعند مسافة ثابتة منها i_1 ، ويمكن لهذا المنشور أن يدور حول محور هذه العدسة لإمكان تغير المسافة بين الصورتين ، ويوضع المنشور W_2 فى أنبوبة الميكروسكوب عند مسافة متغيرة i_2 ويمكن أن يزاح إلى وضعين ، مواز (أ) وعمودى (ت) على محور العدسة الشيئية . ولكل من هذين المنشورين مستوى خارجى لهدف التداخل الضوئى الخاصة به ، وتضم هذه الهدف لتتطابق مع البؤرة الخلفية F' للعدسة الشيئية . وتوضع فتحة مستطيلة D فى المستوى البؤرى الأمامى للعدسة المجمعة للضوء C . ويوجد مستقطب P polariser قبل هذه الفتحة ومحال analyser A خلف المنشور W_2 ، وتكون الفتحة D والوح النصف موجى H والمستقطب P حول محور العدسة الشيئية .

ويبين الشكل رقم (٧/٩) الوضع الابتدائى للمكونات P, A, H & S بالنسبة لوضع المنشورين W_1, W_2 وتبين E_1, E_2 حافتى الإسفينين a_1, a_2 زوايا هذين الإسفينين العلويين المقابلة لهاتين الحافتين والثان تخصصان المنشورين W_1, W_2 وتمثل F F احد الاتجاهات الرئيسية لنذببات الضوء light vibrations للوح النصف موجى SS, H اتجاه الفتحة

وفى ميكروسكوب التداخل الضوئى المستخدم الانكسار المزوج المتغير VDRI تترك الموجة - المستقطبة استوائيا بالمستقطب P - العدسة المجمعة للضوء C وتشكل نتيجة مرورها بالجسم الشفاف O . وتحدث إزاحة فى الطور phase shift نتيجة لفرق المسار الضوئى الذى حدث لنفاذها من خلال هذا الجسم . وتمر جبهة هذه الموجة من العدسة الشيئية ob وتتقسم بالمنشورين W_1, W_2 إلى جبهتين مستطيتين فى اتجاهين متعاكسين . وعند مرورهما خلال المحل analyser A تتداخل الموجتان مع بعضهما وتكونا صورتين للجسم O بجانب بعضهما laterally duplicated ، وتتغير الإزاحة العرضية بدوران المنشور W_1 ، وتمثل π, π' مستوى الجسم والصورة على الترتيب ، oc عدسة عينية . و W_3 عبارة عن منشور ولاستون بزاوية إسفين مقدارها a_3 ، ويمكن أن يحل محل المنشور W_2 .

وقد قسم "Pluta" (١٩٧٢) أشكالاً للمتجهات vectorial diagrams ، وذلك لتوضيح جبهة الموجة المحصلة في الحالات المختلفة لترتيب وضع المنشور W_1 بالنسبة لوضع المنشور W_2 ، وتصل بقية قياس فرق طول المسار الضوئي بطريقة مجال الهدب fringe field - باستخدام منشور ولاستون - إلى 0.05λ ، حيث λ هي طول موجة الضوء المستخدم ، وبذلك يكون الخطأ في تعيين معاملات الانكسار والانكسار المزدوج بهذه الطريقة أقل من $0.003 - 0.001$ ، وبقياس قطر الشعيرة في حوالي ١ ميكرومتر - Pluta, 1972 .

ويمكن استخدام الضوء أحادي طول الموجة ($\lambda = 546$ نانومتر) أو الضوء الأبيض ، ويستخدم الأخير لتحديد مكان الهدبة الصفيرية (Faust and Marrinan, 1955) achromatic fringe . ويمكن استخدام طريقة التداخل التفاضلي differential interference method وطريقة مجال الهدب fringe field method مع ميكروسكوب بلوتا ، وتعتبر الطريقتان مناسبتين لتعيين الانكسار المزدوج للألياف والشرائح الرقيقة ، وخصوصاً العينات ذات التركيب غير المتجانس ويقدم ميكروسكوب التداخل الضوئي بلوتا طريقة سهلة وسريعة لقياس معاملات الانكسار المزدوج للألياف غير المتجانسة التركيب والتي لها مقاطع عرضية منتظمة وغير منتظمة . ولهذا الجهاز فائدة كبيرة عند دراسة الألياف التي لها معاملات انكسار عالية جداً أو عند استخدام سائل غير معامل انكساره يختلف عن معامل انكسار الشعيرة بمقدار كبير - Hamza and Sikorski, 1978 .

هذا وقد ناقش "Pluta" (١٩٧٢) مميزات هذا الجهاز من حيث استخدامه في مجال بحوث الألياف . وأجرى حمزة ومجموعته دراسة مكثفة على الألياف الطبيعية والتركيبية باستخدام هذا الميكروسكوب - انظر : Hamza, 1986 والبحوث المذكورة في هذا البحث .

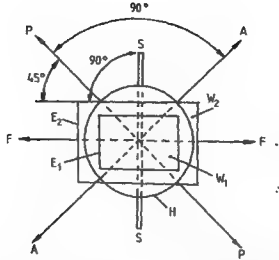
٥/٢/٩- ازدواج الصورة في ميكروسكوب التداخل الضوئي

The shearing effect in interference microscopy :

تعتمد طريقة ازدواج الصورة على الانقسام الجانبي للصورة ، وعندما يكون الانقسام أكبر من الجسم ينتج انقسام كلي للصورة total image splitting . وعندما يكون للانقسام الجانبي للصورة قيمة في حدود قريبة من أقل قيمة تحدث انقسام ومن ثم انفصال ، يسمى بالانقسام التفاضلي differential splitting

[illegible]

-۲۴۷-



شكل رقم (٧/٩) : الاتجاهات الابتدائية للعناصر الرئيسية التي يقوم عليها الميكروسكوب الموضح في شكل (٧/٩) (من Pluta 1972)

وبعد استخدام ميكروسكوب التداخل الضوئي لبلوتا يمكن الحصول على ازواج في الصورة ، وذلك باستعمال عدسات شبيثة لها قوة انقسام عالية (من نوع Polarising inter-ference objectives) . ويكون منشور ولاستون W_2 الموجود في رأس الميكروسكوب والمنشور W_1 الموجود في شبيثة الميكروسكوب مع المستقطب والمحلل المتعامدين أو المتوازيين والفتحة slit تكون في مجموعها نوعاً من مقياس التداخل الضوئي ثنائي الاستقطاب — Polskie Zakłady optyczne (PZO) 1976- double polarising inter-ferometer — ويمكن أن ينور منشور ولاستون الموجود في الشبيثة حول محور رأسي لضبط مقدار انفصال الصور . ويعطى الحد الأقصى لهذا الانقسام (r) عندما تكون زاوية الدوران المنشورين لها نفس الاتجاه same orientation وفي هذه الحالة تكون :

$$r = r_1 + r_2$$

حيث r_1, r_2 هما مقداراً الانقسام الذي يمكن الحصول عليه بواسطة المنشور الأول والثاني على الترتيب .

وإذا عكس المنشور الثاني بحيث تكون زاوية دورانه عكس اتجاه المنشور الأول فإن :

$$r = r_1 - r_2$$

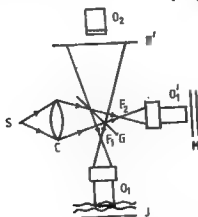
وينتج عن دوران المنشور الثاني الموجود في شبيثة الميكروسكوب حول محور رأسي قيمة انقسام الصورة image shearing value تتراوح بين $(r_1 + r_2)$ الى $(r_1 - r_2)$.

٦/٢/٨ - ميكروسكوب التداخل الضوئي زايس لنيك

The Ziess-Linnik interference microscope

يقدم هذا الجهاز تطبيقا هاما لقياس ميكلسون للتداخل الضوئي وذلك لدراسة تضاريس الأسطح ، وهو يعتبر جهاز حديث نسبيا وقد صممه وبناه "Linnik" (١٩٣٢) . ويبين الشكل رقم (٨/٩) تركيب هذا الجهاز حيث S مصدر الضوء ، C عدسة مجمعة ، G مجزئ لحزمة الأشعة ، ويميل بزاوية مقدارها 45° على المحور الأفقي ، وينعكس جزء من الضوء في اتجاه العدسة الشبيثة O_1 لتسقط على السطح المراد فحصه ، وتنعكس الأشعة من هذا السطح حاملة المعلومات عنه في اتجاه العدسة العينية O_2 خلال مجزئ حزمة الأشعة G ، وينفذ الضوء خلال G إلى الشبيثة O_1' المماثلة للعدسة O_1 ، ثم تنعكس هذه الأشعة على المراة المستوية M لكي تصل إلى O_1 ، ثم تنعكس إلى G لكي تصل إلى العدسة العينية O_2 .

وتتكون صورتان F_1, F_2 للمصدر S عند بؤرة كل من الشبيتين O_1, O_1' وتتداخل الموجتان ، الأولى هي الموجة المعجلة التي تحمل معلومات من سطح الجسم J والثانية هي الموجة المستوية المرجع plane wave reference ويتم ذلك عند P' التي يمكن ملاحظتها بالعينية O_2 . وتتكون خريطة لهيب التداخل الضوئي الثاني . ويتم دراسة تضاريس سطح الجسم من شكل الهيب وقيم إزاحتها .



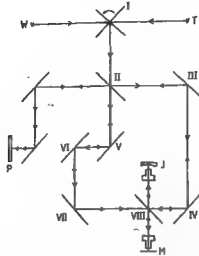
شكل رقم (٨/٩) : ميكروسكوب التداخل لنيك

ويبين الشكل رقم (٩/١) مسار الضوء في ميكروسكوب التداخل الضوئي «زايس» - لديك ، ويتم التداخل بين شعاعين منعكسين ، أحدهما من المرآة المرجع المستوية والشعاع الآخر منعكس من الجسم تحت الفحص . وتكون المرآة المرجع على هيئة غطاء cap لعدسة شبيثة وعلى مسافة محددة منها ، ويوجد ثلاث أغطية لهما انعكاسية ٢٠ ، ٦٠ ، ٩٠٪ لكل من عدسات الشبيثة الثلاث المتوفرة في الجهاز ، وقوة تكبيرها هي على الترتيب ١٠ ، ٢٥ ، ٦٠ مرة ، ويختار الغطاء cap بحيث يكون انعكاسيته أقرب ما تكون إلى انعكاسية العينة المراد فحصها . وكلما زاد مقدار التكبير كلما قرب الغطاء من العدسة ، وهذه هي أيضا ظروف ضبط المسافة بين السطح المراد فحصه والعدسة الشبيثة الموجودة في مسار الأشعة لإضاءة العينة واتجميع الضوء المنعكس من سطحها والذي يحمل المعلومات عن تضاريس هذا السطح .

ويمكن قياس تضاريس سطح الأجسام في المدى من $\lambda/2$ إلى 20λ وذلك في الاتجاه العمودي على هذا السطح . ويستعمل مصدر ضوئي أحادي الطول الموجي هو مصباح الثاليوم ($\lambda = 530$ نانومتر) ، ويستبدل بهذا المصدر مصدر ضوئي أبيض للحصول على هدب بيضاء ذات رتبة تداخل منخفضة low-order white light fringes وذلك بدوران العاكس I الموضح في الشكل رقم (٩/١) . ويتم القياسات الدقيقة باستخدام الضوء أحادي طول الموجة ، ثم يحل الضوء الأبيض محل مصباح الثاليوم ونحصل على هدب بيضاء ذات رتبة منخفضة ، وبعد ذلك يحل مصباح الثاليوم محل المصباح الأبيض ، وبهذه الطريقة تتكون هدب أحادية اللون ذات تباين contrast عال وواضحة على امتداد مجال الرؤية . وتستخدم عينية تلسكوب لرؤية الهدب المتكونة أو تستخدم كاميرا لتسجيل خريطة التداخل الضوئي .

ويتميز نظام التداخل الضوئي في ميكروسكوب زايس - لديك بإمكانية تغيير كل من اتجاه وقوة تفرق linear dispersion الهدب بضبط شريحة توضع في مسار أحد الشعاعين . ويلاحظ أن أحد الفروق الأساسية بين هدب التداخل الضوئي الثنائي المتكونة بهذا النوع من الميكروسكوب وهدب فيزو محددة الموقع localised Fizeau fringes هي أنه بينما يكبر الجهاز الأول السطح المراد فحصه أولا وبعد ذلك يتم تكوين هدب التداخل الضوئي عليه ،

فإنه في حالة هذب فيزو تتكون الهدب محدة الموقع قريبة من مقياس التداخل الضوئي ،
ويعد ذلك تسجل صورة مكبرة لها على اللوح الحساس .



شكل رقم (٩/٩) : رسم تخطيطي لمسار الضوء في ميكروسكوب التداخل لزايس - لتيك T مصباح ثالييم
W ، مصدر ضوء أبيض ، J الجسم ، M مرآة مرجح ، I مرآة عاكسة ، P لوح فوتوغرافي II مرآة
نصف مفضضة III ، IV ، V ، VI ، VII ، أسطح مفضضة عاكسة

٧/٢/٩ - مقياس التداخل الضوئي (ملاخ وزندر) :

The Mach-Zehnder interferometer

في مقياس جامن للتداخل الضوئي Jamin interferometer تعمل الأسطح الأمامية
للشريحتين المتكوتتين لهذا الجهاز كمجزئات لحزمة الأشعة الضوئية ، وتعمل الأسطح الخلفية
كمرايا مستوية ، ولا يمكن ضبط هذه العناصر كلا على حدة ، ويكون فصل الشعاعين محددا
بسمك هاتين الشريحتين ، ويكون البعد كبيرا بين الشعاعين في مقياس ملاخ وزندر
- Zehnder 1891, Mach 1892 - حيث تكون مجزئات حزمة الأشعة والمرايا العاكسة
عناصر منفصلة من بعضها .

ويبين الشكل رقم (١٠/٩) مسار الأشعة في مقياس ملاخ وزندر . S مصدر ضوئي
أحادي طول الموجة عند المستوى البؤري للعدسة L1 وتنقسم حزمة متوازية من الأشعة -
عند السطح النصف هاكس (A1) semi-reflecting surface للشريحة الزجاجية D1
ذات الأسطح المتوازية - إلى حزمتين تتحدان بعد انعكاسهما من المرأتين المستويتين

M_1, M_2 وذلك عند السطح النصف عاكس (A_2) للشرية الزجاجية D_2 ذات الأسطح المتوازية وتخرج الأشعة لتتجمع بواسطة العدسة L_2 . افترض أن W_1 هي جبهة موجة مستوية plane wavefront في الشعاع الذي يمر بين المرآة M_1 ، والشرية الزجاجية D_2 ، W_2 هي جبهة الموجة المستوية المقابلة لها في الشعاع الذي يمر بين المرآة M_2 ، والشرية الزجاجية D_2 ، W_1' هي جبهة الموجة المستوية التقديرية wavefront virtual plane الموجودة بين المرآة M_2 والشرية D_2 والتي تخرج من الشريحة الأخيرة منطبقة على W_1 . وعند نقطة مثل P على جبهة الموجة W_2 فلن نفرق الطور التقديرى virtual phase difference بين الأشعة الخارجية – Born and Wolf, 1980

- يكون :

$$\delta = 2 \pi n h / \lambda$$

حيث :

$$h = PN$$

وهي المسافة الرأسية من P إلى W_1' ، n هي معامل انكسار الوسط الموجود بين W_1' ، W_2 وتظهر عند النقطة p' المرافقة للنقطة p هذب مضيقية في حالة :

$$m\lambda = n\lambda , \quad |m| = 0, 1, 2, \dots$$

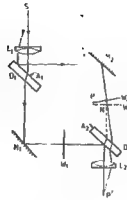
وتظهر عمليا ثلاث حالات للأجسام التي تغير من طور الموجة phase objects :

أ- الأجسام ذات البعدين Two-dimensional phase objects والتي لايتغير فيها معامل الانكسار في اتجاه انتشار الأشعة .

ب- الأجسام المتماثلة قطريا Radially symmetric phase objects .

ج- الأجسام غير المتماثلة Asymmetric phase objects .

وفي الحالة الأولى يكون طول الجسم الذى يغير من طور الموجة هو L في اتجاه انتشار الأشعة ، وبذلك يكون معامل الانكسار دالة في y, z فقط .



شكل رقم (١٠/٩) : مسار الضوء في مقياس التداخل (ملاخ وزندر)

معادلة إزاحة الهدبة : Fringe shift equation

عند وضع جسم شفاف لتغيير طور الأشعة Phasor في أحد مسارات الأشعة لمقياس ملاخ ، وزندر (شكل رقم ١١/٩) فإن إزاحة الهدبة $\delta(y,z)$ تعطى بالمعادلة :

$$\delta(y,z) = \frac{1}{\lambda} \int_{x_0}^{x_1} (n - n_0) dx \quad n = n(x, y, z)$$

حيث n_0 هي معامل الانكسار في وسط الشعاع الذي لم يحدث له تغير $undisturbed$ beam ، λ هي طول موجة الضوء .

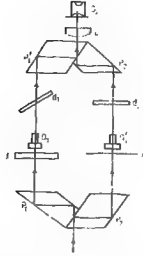
ولإثبات هذه المعادلة نلاحظ أن المسار الضوئي للشعاع الذي حدث له تغير $disturbed$ ray مقاسا بالأطوال الموجية يكون :

$$N_d = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{\lambda}$$

ويعطى الفرق $(N_d - N_0)$ المضاعفات العددية للمقدار (2π) حيث يختلف بها الشعاعان في الطور عند إعادة اتحادهما ويساوى بالكاد هذا الرقم إزاحة الهدبة $\delta(y,z)$.
وإذا كان :

$$n = n(y,z)$$

$$n(y, z) - n_0 = \frac{\delta\lambda}{x_1 - x_0} = \frac{\delta\lambda}{L} \quad \text{ينتج أن :}$$



شكل رقم (١٢/٩) : النظام البصري ومسار الأشعة في ميكروسكوب التداخل البينز

References

- Barer R 1955 *Phase Contrast, Interference Contrast and Polarizing Microscopy* Analytical Cytology Series (New York: McGraw-Hill)
- Beyer H and Schöppe G 1965 Interferenzeinrichtung für durchlicht Mikroskopie *Jenaer Rundschau* **10** 99-105
- Born M and Wolf E 1980 *Principles of Optics* 6th edn (London : Pergamon) p315
- Dyson J 1950 Proc. R. Soc. A **204** 170
- 1953 *Nature* **171** 743
- Fatou J E 1978 Optical microscopy of fibres in *Applied Fibre Science* ed. F Happey vol. 1 (London : Academic) Ch. 3
- Faust R C and Marrinan H J 1955 *Br. J. Appl. Phys.* **6** 351
- Françon M 1961 *Progress in Microscopy* (London : Pergamon) pp94-128
- Hamza A A 1986 *J. Microsc.* **142** 35
- Hamza A A, Fouda I M and El-Farahaty K A 1986 *Int. J. Polym. Mater.* **11** 169
- Hamza A A and Sikorski J 1978 *J. Microsc.* **113** 15
- Heyn A N J 1954 *Fibre Microscopy* (New York: Interscience)
- 1957 *Textile Res. J* **27** 449

- Linnik W 1933 *C.R. Acad. Sci. URSS* **1** 21
- Mach L 1892 *Z. Instrkde.* **12** 89
- Nomarski G 1955 *J. Phys. Radium, Paris* **16** 95
- Pluta M 1965 *Przegląd Włókienniczy* **19** 261
- 1971 *Opt. Acta* **18** 661
- 1972 *J. Microsc.* **96** 309
- Pluta M 1982 *Mikroskopia Optyczna* (Warszawa : Państwowe Wydawnictwo Naukowe) In Polish)
- Polskie Zakłady Optyczne (PZO) Instruments 1976 *Biolar Polarizing Interference Microscope, Description and Instruction Manual*
- Steel W H 1986 *Interferometry* (Cambridge : Cambridge University Press)
- Stoves J L 1957 *Fibre Microscopy* (London : National Trade Press)
- Tolansky S 1948 *Multiple-Beam Interferometry* (Oxford: Clarendon)
- 1973 *An Introduction to Interferometry* (London : Longman) pp 210-23
- Zehnder L 1891 *Z. Instrkde* **11** 275

الفصل العاشر

التشتت الخلفى لموجات الضوء بواسطة الألياف

Back-scattering of Light Waves from Fibres

١٠/١- حالة سقوط الضوء عموديا على محور الشعيرة

The case of a beam of light incident perpendicular to the fibre axis

تستخدم الألياف البصرية كوسط حامل للمعلومات ينفذ من خلاله الضوء في أنظمة التراسل الضوئى ، وتتكون الشعيرة من إسطوانتين متحدتين في المركز ومن مادتين عازلتين وطولها كبير جدا (كيلومترات) وذات قطر خارجى ≈ 125 ميكرومتر . وتتكون الإسطوانة الداخلية (لب الشعيرة) من مادة معامل انكسارها n_{core} يزيد قليلا عن معامل انكسار مادة الاسطوانة الخارجية (قشرة الشعيرة) n_{clad} ومعاملا انكسار لب الشعيرة وقشرتها وقطر لب الشعيرة هي ثلاث بارامترات تحدد خصائص الشعيرات من حيث نفاذيتها للضوء . ومن المفيد وجود طريقة لا إتلافية non-destructive technique لقياس قيم معاملات انكسار وأقطار طبقتى هذه الألياف يمكن استخدامها لقياس وضبط هذه القيم في أثناء تصنيع وسحب هذه الألياف .

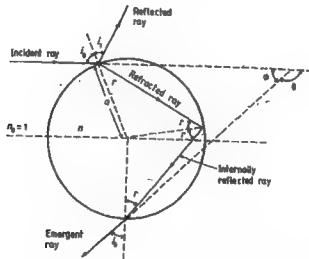
وكخطوة أولى نحو هذا الهدف سنشرح طريقة تعيين معامل انكسار وقطر الشعيرات التى ليس لها قشرة uncladded optical fibres التى اقترحها "Presby" (١٩٧٤) وتعتمد هذه الطريقة على تحليل الضوء المشتت خلفيا back-scattered light عندما يسقط شعاع ليزر مستمر cw laser عموديا على محورها . وبإجراء تحليل باستخدام طرق البصريات الهندسية ، نجد أنه في النموذج المكون من هب متعاقبة يكون موقع الانقطاع الحاد sharp cut-off يمكن أن يحدد معامل انكسار مادة الشعيرة المكونة من طبقة واحدة ، بينما يمكن تعيين قطر هذه الشعيرة من المسافة بين نهايتين صغيرتين للضوء المتكون على هذا النموذج .

ونستخدم هنا طريقة Presby وتطبيقها على ألياف زجاج الصودا soda glass والسيليكا Silica والبيركس Pyrex والتي ليس لها قشرة ، وتراوح أقطار هذه الألياف من

١٠٠ إلى ٢٠٠ ميكرومتر . وكما هو الحال في طريقه Presby ، فإنه سيؤخذ في الاعتبار انعكاس داخلي واحد .

١/١٠- تحليل التشتت الخلفي : Back-scattering analysis :

افترض أن حزمة متجمعة من الضوء أحادي اللون وطول موجته λ سقطت على شعيرة من الزجاج ليس لها قشرة مع استخدام ضوء مستقطب في اتجاه يوازي محور الشعيرة في هذه القياسات ، حيث توضع حسابات معاملات فرتل Fresnel coefficients أن الضوء المستقطب في اتجاه عمودي على محور الشعيرة يكون له حد أدنى من الشدة الضوئية minimum irradiance عندما يخرج من الشعيرة عند زوايا قريبة جدا من Φ_m ، كما هو موضح في الشكل رقم (١/١٠) .



شكل رقم (١/١٠) : الشعاع الساقط والمنعكس والمنكسر .

وباستخدام طرق البصريات الهندسية نجد أنه عندما يسقط شعاع على الشعيرة ينتج شعاعا منعكسا وشعاعا منكسرا داخليا في الشعيرة ، كما في شكل رقم (١/١٠) . وفي الوسط المتجانس والمتماثل ضوئيا تكون هذه الأشعة عبارة عن خطوط مستقيمة وعند السطح الفاصل بين الشعيرة والوسط المحيط بها ، يتغير اتجاه هذه الأشعة حسب قانون الانعكاس وقانون سنيل Snell's law لانكسار ويمكن باستخدام هذين القانونين تتبع مسار الأشعة في الشعيرة حتى نصل إلى الشعاع الخارجى الذى يكون نموذج التشتت

الخلي . وبالإضافة فإنه يجب أن يؤخذ في الاعتبار تأثيرات التداخل التي تحدد الشدة الضوئية irradiance في هذا النموذج ، وذلك من خلال معاملات فرنل Fresnel coefficients .

وإذا كانت i هي زاوية سقوط شعاع ضوئي عند نقطة معينة ، r هي زاوية الانكسار فإن الشعاع ينحرف بزاوية مقدارها $(i-r)$ عندما يتغذى إلى الشعيرة . وعند انعكاس هذا الشعاع عند السطح الخلفي للشعيرة فإنه يعاني انحرافا آخر مقداره $(\pi-2r)$. وأخيرا فإن هذا الشعاع يعاني انحرافا ثالثا مقداره $(i-r)$ عند خروجه من الشعيرة . وبذلك نحصل على الانحراف الكلي Θ لهذا الشعاع من المعادلة :

$$\Theta = \pi + 2i - 4r$$

ولحساب الحد الأدنى للانحراف الزاوي minimum angular deviation $d\Theta/di$ نساوي هذا المعامل التفاضلي الأول بالصفر ، وتعطى النتيجة - في حالة وضع $n_0 = 1$ - تعطى زاوية السقوط المقابلة لزاوية الانحراف الصغرى minimum deviation

$$\Theta = \pi + 2i - 4 \sin^{-1} \left(\frac{\sin i}{n} \right) \quad (10.1)$$

$$\frac{d\Theta}{di} = 2 - \frac{4 \cos i}{(n^2 - \sin^2 i)^{1/2}} \quad (10.2)$$

when $d\Theta/di \rightarrow 0$, hence $i = i_m$, and

$$\cos i_m = \left(\frac{n^2 - 1}{3} \right)^{1/2} \quad (10.3)$$

وهذه هي قيمة i المقابلة لأقل انحراف مستقر stationary minimum ، ويمكن ملاحظة ذلك بأخذ المعامل التفاضلي الثاني $d^2\Theta/di^2$ وملاحظة أنه موجب .

ومن المعادلة رقم (١٠-٢) يصرف نصف العرض الزاوي لنموذج التشتت The angular half width of the scattered pattern (Φ_m) ، وعلاقته بالبارامترات المقاسة h, L_m ونحصل من الشكل رقم (١٠/٢) على المعادلة الآتية :

$$L_m = h \tan \varnothing_m \quad (10.4)$$

وحيث إن :

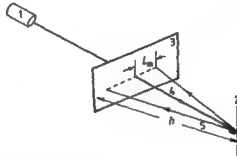
$$\varnothing = \pi - \theta$$

$$\varnothing_m = 4 \sin^{-1} \left(\frac{\sin i_m}{n} \right) - 2i_m \quad (10.5)$$

ونحصل فى النهاية على :

$$\varnothing_m = 4 \sin^{-1} \left[\frac{2}{n\sqrt{3}} \left(1 - \frac{n^2}{4} \right)^{1/2} \right] - 2 \sin^{-1} \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{n^2}{4} \right)^{1/2} \right] \quad (10.6)$$

وتوضح المعادلة رقم (١٠-٦) أن مواقع الانقطاع الحاد sharp cut-off فى نموذج التشتت الخلفى لشماع الليزر عندما يسقط على شعيرة من الزجاج يسمح بتعيين معامل انكسار مادة الشعيرة .



- شكل رقم (١٠/٢) : النظام البصرى المستخدم للحصول على نموذج التشتت الخلفى
- 1- حزمة أشعة ليزر هيليوم - نيون بطول موجى ٦٣٢,٨ نانومتر .
 - 2- شعيرة بدون قشرة
 - 3- حائل أبيض
 - 4- الأشعة الساقطة على الشعيرة
 - 5- الأشعة المشتتة خلفيا .

١٠/٢- الطريقة المعملية لتعيين معامل انكسار مادة الشعيرة

Determination of refractive index of the fibre material, experimental procedure

يوضح الشكل رقم (١٠/٢) النظام البصرى المستخدم للحصول على التشتت الخلفى من

الألياف ، وفيه يمر شعاع ليزر هيليوم - نيون خلال فتحة في حائل أبيض ثم يسقط على الشعيرة . ويسقط الضوء المشتت خلفيا back-scattered light على نفس الحائل ويسجل فوتوغرافيا . ويحجب الضوء المشتت في الاتجاهات الأخرى من الوصول إلى الكاميرا . ويقع الضوء المشتت خلفيا كله في مدى انحراف زاوي $\theta \approx \pm 20^\circ$ مقاسا من اتجاه الشعاع الساقط . ويكون النموذج الكامل للتشتت متماثلا حول $\theta = 0$ صفر . وطول موجة الضوء المستخدم $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ أنجستروم . ويبين الشكل رقم (٣/١٠) نموذج التشتت الخلفي لشعيرة من زجاج الصودا soda glass ذات قطر حوالى ٢٠٠ ميكرومتر .



شكل رقم (٣/١٠) : نموذج التشتت الخلفي لحزمة من الأشعة سقطت على شعيرة من زجاج الصودا قطرها حوالى ٢٠٠ ميكرون

٣/١٠- التشتت الخلفي لشعاع الليزر بواسطة شعيرة مكونة من لب وقشرة

Back-scattering of laser radiation from a cladde fibre :

يمكن تعيين الخصائص الفيزيائية للألياف البصرية المستخدمة في أنظمة التراسل الضوئى مثل الألياف ذات اللب والقشرة cladde fibres ، وذلك من التشتت الخلفي لشعاع ليزر يسقط عموديا على محور الشعيرة .

فقد درس هو ومعاونوه "Ho et al" عام (١٩٧٥) موضوع التشتت الخلفي في حالة الألياف البصرية ، حيث $n_{\text{core}} > n_{\text{clad}}$ ، وهو شرط أساسى لحدوث الانعكاس الكلى الداخلى داخل لب الشعيرة وعند سطح الانفصال مع القشرة .

ويتميز التشتت الخلفي من الألياف البصرية ذات اللب والقشرة بوجود موقعين للانقطاع الحاد two sharp cut-offs .

التشتت الخلفي في حالة شعيرة معامل انكسار طبقيتها $n_{core} > n_{clad}$ وباعتبار حدوث انعكاس داخلي واحد :

The case of an optical fibre with $n_{core} > n_{clad}$, considering single reflection :

يمكن دراسة نموذج التشتت الخلفي في هذه الحالة باستخدام التقريب في طرق البصريات الهندسية ويبين الشكل رقم (٤/١٠) مسار الشعاع الساقط بعد انكساره ، ويوضح الزوايا المناظرة للانكسار والانعكاس ، وتبين المعادلة الآتية العلاقة بين هذه الزوايا :

$$\theta = \pi - 4\gamma' + 2i + 2i' - 2\gamma = \pi - \varnothing$$

ويوضح :

$$\left. \frac{d\varnothing}{di} \right|_{i=i_m} = 0$$

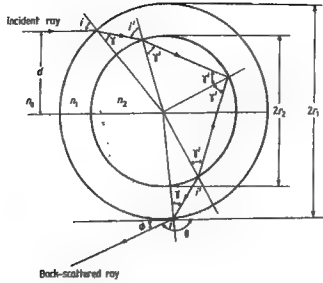
يمكن أن نصل الى المعادلة الآتية في i_m :

$$\frac{2 \cos i_m}{[(n_2' r_2 / r_1)^2 - \sin^2 i_m]^{1/2}} + \frac{\cos i_m}{(n_1'^2 - \sin^2 i_m)^{1/2}} - \frac{\cos i_m}{[(n_1' r_2 / r_1)^2 - \sin^2 i_m]^{1/2}} = 1 \quad (10.7)$$

حيث :

$$n_2' = \frac{n_2}{n_0} = n_{core} \text{ and } n_1' = \frac{n_1}{n_0} = n_{clad}$$

n_0 هو معامل انكسار الوسط المحيط بالشعيرة (هواء)



شكل رقم (٤/١٠) : يوضح مسار الشعاع المشتت خلفيا باعتبار حدوث انعكاس واحد داخل لب الشعيرة التي لها البارامترات التالية : معامل انكسار القشرة ، n_2 معامل انكسار لب الشعيرة ، r_1 نصف قطر الشعيرة ، r_2 نصف قطر لب الشعيرة

ويمكن أن تحل المعادلة رقم (٧/١٠) تحليليا بصعوبة بالنسبة إلى i_m ولكن يمكن الحصول على تقريب مناسب يوضع $r_1 = r_2$ ، وفي هذه الحالة تحصل على المعادلة الآتية لأكبر زاوية تشتت خلفي Φ :

$$\Phi_m = 1 = 4 \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{n_c} \left[\frac{4}{3} n_c^2 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} - 2 \cos \left\{ \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \left(n_i \frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right\}$$

$$\left[-2 \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{n_s} \left[n_s^2 + \frac{1}{4} n_c^2 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} + 2 \cos^{-1} \left[\frac{1}{n_s} \left\{ n_s^2 + \frac{4}{3} \left[\frac{1}{4} n_c^2 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{1/2} \right] \right]$$

حيث :

$$n_c = n_{\text{core}} \text{ and } n_s = n_{\text{clad}}$$

وفي حالة الشعيرة المتكونة من لب فقط unclad fibre يوضع :

$$r_1 = r_2, n_c = n_s = n \quad \text{and } n_o = 1$$

وتؤول المعادلة الأخيرة إلى المعادلة التي توصل إليها Presby (١٩٧٤) .

التشتت الخلفي في حالة ألياف بصرية باعتبار حدوث انعكاسين داخليين :

The case of optical fibres, considering two internal reflections :

توضع المعادلات الآتية تحليلا للتشتت الخلفي لشعاع الليزر عندما يسقط عموديا على شعيرة ويحدث انعكاسين داخليين عند سطح الانفصال بين لب الشعيرة وقشرتها . ويبين الشكل رقم (٥/١٠) مسار الشعاع الساقط الذي يعاني انكسارات وانعكاسات حيث توضع الزوايا في كل حالة . وتعطى المعادلة الآتية العلاقة بين هذه الزوايا :

$$\theta = 2\pi - 6\gamma' + 2i + 2i' - 2\gamma = 2\pi - \varnothing$$

ويوضع :

$$\left. \frac{d\varnothing}{di} \right|_{i=i_m} = 0$$

يمكن أن نصل إلى المعادلة الآتية في i_m

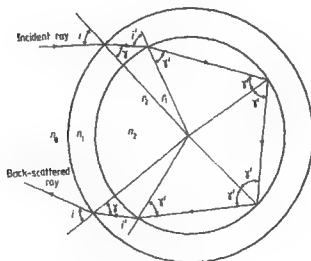
$$\frac{3 \cos i_m}{[(n_c r_2 / r_1)^2 - \sin^2 i_m]^{1/2}} + \frac{\cos i_m}{(n_s^2 - \sin^2 i_m)^{1/2}} - \frac{\cos i_m}{[(n_s r_2 / r_1)^2 - \sin^2 i_m]^{1/2}} = 1$$

وبفرض أن $r_1 = r_2$ فإن المعادلة الآتية تعطى قيمة أقصى زاوية تشتت خلفي Φ_m :

$$\begin{aligned} \varnothing_m = 2 = & 6 \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{n_c} \left[\frac{9}{8} n_c^2 - \frac{9}{8} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} - 2 \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2\sqrt{2}} \left[\left(n_c \frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{1/2} \\ & - 2 \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{n_s} \left[n_s^2 + \frac{1}{8} n_c^2 - \frac{9}{8} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} + 2 \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{n_s} \left[n_s^2 + \frac{1}{8} \left(n_c \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \frac{1}{9} - \frac{8}{9} \right) \right] \right\}^{1/2} \end{aligned}$$

ويمكن الحصول على المعادل الآتية التي تعطى قيمة Φ_m لأي عدد من الانعكاسات
الداخلية m داخل لب الشعيرة :

$$\begin{aligned} \Phi_m = & 2(m+1) \cos^{-1} \left[\frac{1}{n_c} \left\{ \frac{(m+1)^2}{m(m+2)} \left[n_c^2 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \right] - 2 \cos^{-1} \left[\left(\frac{n_c r_2 / r_1}{m(m+2)} \right)^{1/2} \right] \\ & - 2 \cos^{-1} \left[\frac{1}{n_s} \left\{ n_s^2 + \frac{(m+1)^2}{m(m+2)} \left[\frac{n_c^2}{(m+1)^2} - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \right] \\ & + 2 \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{n_s} \left[n_s^2 + \frac{(m+1)^2}{m(m+2)} \left(\frac{(n_c r_2 / r_1)^2}{(m+1)^2} - 1 \right) \right]^{1/2} \right\} \end{aligned}$$



شكل رقم (٥/١٠) : يوضح مسار الشعاع المشتت خلفيا باعتبار حدوث انعكاسين اثنين داخل لب الشعيرة التي لها البارامترات الآتية : معامل انكسار قشرة الشعيرة ، n_2 معامل انكسار لب الشعيرة ، r_1 نصف قطر لب الشعيرة ، r_2 نصف قطر الشعيرة .

ويمكن الآن حساب قيمة n_c بمعرفة :

$$\Phi_m = \tan^{-1} (L_m/h)$$

حيث $2L_m$ هو الطول الحقيقي بين النقط التي تعطي الانقطاع الحاد ، h هي المسافة بين الشعيرة ومركز نموذج التشتت الخلفي على الحائل .

ويتم تعيين قيمة n_g باستخدام طريقة الحد الفاصل لبليك Becke-line method - انظر : Hartshorne and Stuart, 1970 .

ويتعين قيمة Φ_m عندما تكون $m = 1$ ، $m = 2$ يمكن حساب n_g ، n_c عندما تكون $\frac{r_1}{r_2}$ معلومة .

ويستخدم الحاسب الآلي لإجراء هذه الحسابات .

١٠/٤- تشتت شعاع من الضوء يمر داخل الشعيرة في اتجاه محورها

Light scattering of a beam incident through the fibre along its axis :

يحدث تشتت الضوء في الألياف البصرية نتيجة إلى العاملين الآتيين :

١- تشتت رالي Rayleigh Scattering وهو العامل الأساسي للفقد في الشعيرة .

٢- عدم التجانس نتيجة لوجود فقاعات صغيرة micro-bubbles وبلورات صغيرة micro-crystals وشقوق دقيقة micro fractures والتي تعتبر بالتقريب تشتتاً متماثلاً isotropic scattering وتحدث قنراً كبيراً من التشتت في طول معين من الشعيرة نتيجة للتشوهات الهندسية والبصرية الصغيرة للألياف مثل الانحناءات الدقيقة micro-bending وأية تغيير في قطر لب الشعيرة أو من الاتساع العددي numerical aperture أو من بروفيل معامل انكسار الشعيرة .

١٠/٢- التشتت الخلفي في اتجاه محور الشعيرة

Back-scattering along the optical fibre axis:

يقدم التشتت الخلفي الناتج من الشعيرة طريقة لا إتلافية تتطلب طرفاً واحداً للشعيرة

ونطلق عليها طريقة "Optical time domain reflectometry (OTDR)". وقد تم تطويرها بواسطة « بارنوسكى و Jensen » (١٩٧٦) كما شارك فى ذلك مؤلفون آخرون مثل « كوستا وسوردو » (١٩٧٧ a,b) , « Personick » , و « بيانوسيت » (١٩٧٧) .

وتقوم هذه الطريقة على إرسال نبضة خلال الشعيرة ، فيتشتت جزء من الطاقة بواسطة الشعيرة ويوجه إلى الخلف ويتولد صدى النبضات مكونا نبضة مظلمة يتم استقبالها وتحليلها عند نفس طرف الشعيرة التى دخل منها الضوء .

١٠/٢-١- النظرية :

يعانى الضوء الذى ينتشر فى الشعيرة من تشتت يتبع الطاقة تشتت رايلى المتماثل isotropic Rayleigh scattering . وإذا اعتبرنا فقط هذا النوع من التشتت فإن الطاقة المشتتة - ورمز لها $P_s(z)$ - عند بعد z من طرف الشعيرة الذى يدخل منه الضوء وفى مقطع طوله dz يكون :

$$P_s(z) = \gamma_s P(z) dz$$

حيث γ_s هى معامل الفقد الناتج من تشتت رايلى لوحدات متر^{-١} ، وذلك باعتبار ثبات قيمته وإن كان عادة قد يتغير مع البعد نتيجة عدم التجانس فى تركيب مادة الشعيرة واطول موجى λ تكون الشدة الضوئية عند بعد z على امتداد الشعيرة تعطيه المعادلة :

$$P(z, \lambda) = P(0, \lambda) \exp \left(- \int_0^z \gamma(\lambda, z) dz \right)$$

حيث $P(0, \lambda)$ تمثل الطاقة الضوئية التى دخلت الشعيرة ، $\gamma(\lambda, z)$ تمثل معامل الفقد فى وحدة الطول التى قد تعتمد على الموقع أى بعد المقطع من طرف الشعيرة . ويمكن

$$\text{تعريف معامل الفقد المتوسط كالآتى : } \bar{\gamma}(\lambda) = \frac{1}{z} \int_0^z \gamma(\lambda, z) dz$$

$$P(z, \lambda) = P(0, \lambda) \exp(-z \bar{\gamma}(\lambda)) \quad \text{على ذلك :}$$

وبافتراض تماثل في التوزيع الزاوي للطاقة المشتتة تقريبا ، يكون جزء الطاقة الذي يدخل الشعيرة والذي يرمز له S تعطيه النسبة بين زاوية القبول المجسمة للشعيرة إلى الزاوية المجسمة الكلية . ينطبق ذلك في حالة شعيرة معامل انكسار لديها ثابت القيمة STEP ، لكنه يكون صحيحا بالتقريب في حالة شعيرة متدرجة معامل انكسار لديها :

$$S = \frac{\pi \Delta^2}{4\pi n_0^2} = \frac{\Delta^2}{4n_0^2}$$

حيث Δ هي قيمة الفتحة العددية للشعيرة ، وتساوي $\frac{1}{2}(n_0^2 - n_1^2)$ ، حيث n_0 هي معامل انكسار اب الشعيرة n_1 معامل انكسار القشرة .

إذ الطاقة المشتتة خلفيا بين z و $z + dz$ هي :

$$P_{bs}(z) = \gamma_s SP(z) dz$$

وهي جزء من الطاقة الضوئية الكلية المشتتة عند البعد z من طرف الشعيرة التي تدخل منها الضوء من مقطع طوله dz . ويكون اتجاهها إلى الخلف نحو مدخل الشعيرة ويحكمها زاوية القبول للشعيرة . وفي رحلتها إلى الخلف تعاني أيضا فقدا .

وتعطي المعادلة الآتية الطاقة المشتتة من z و $z + dz$ التي تصل إلى الكاشف على افتراض أن كفاءة التزاوج هي η :

$$P_{bsd}(z) = \eta P_{bs}(z) \exp \left(- \int_0^z \gamma'(z) dz \right)$$

حيث γ' ترمز إلى معامل الفقد للضوء المشتت خلفيا .

وبالتعويض بقيمة $P_{bs}(z)$ التي تعطىها المعادلة :

$$P_{bs}(z) = \gamma_s SP(z) dz = \gamma_s SP(0) \exp \left(- \int_0^z \gamma(z) dz \right)$$

$$P_{bsd}(z) = \eta \gamma_s SP(0) \exp \left(- \int_0^z (\gamma(z) + \gamma'(z)) dz \right) dz$$

نحصل على :

ويمكن اعتبار معاملى الفقد إلى الأمام وإلى الخلف متساويين ، ومن ثم :

$$P_{\text{bsd}}(z) = \eta \gamma_s SP(0) \exp(-2\bar{\gamma}z) dz$$

وتم تسجيل الطاقة المتولدة عند بعد z بعد فترة زمنية $t = 2z/v_g$ ، حيث v_g هى سرعة مجموعة الأشعة الضوئية فى الشعيرة group velocity ، وإذا كان اتساع النبضة المرسلة هو ΔT ، فإن الطاقة الكلية $p(t)$ الساقطة على الكاشف عند زمن t نحصل عليها بتجميع المعادلة السابقة فى الفترة الزمنية $\Delta T = \frac{2\Delta z}{v_g}$.

وباعتبار ثبات قيمة $\exp(-\bar{\gamma}z)$ على امتداد هذا الطول وبالتعويض بقيمة $T/2$ $z = v_g$ ينتج أن :

$$\begin{aligned} P(t) &= \int_0^{v_g T/2} P_{\text{bsd}}(z) dz \\ &= \eta \gamma_s SP(0) \exp(-2\bar{\gamma}v_g t/2) (v_g \Delta T/2) \\ &= \eta \gamma_s \frac{c}{2n} \Delta TSP(0) \exp(-2\bar{\gamma}v_g t/2) \end{aligned}$$

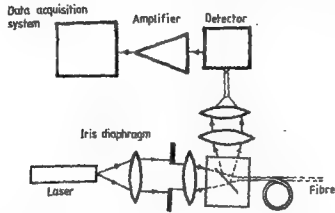
وذلك على أساس ثبات قيمة $P(0)$ فى الفترة الزمنية ΔT ، وإذا لم يكن كذلك فتؤخذ قيمة متوسطة . على ذلك فيكون شكل الموجة العائدة على هيئة دالة أسية يمكن منها حساب معامل الفقد الكلى :

$$\frac{P(t_1)}{P(t_2)} = \exp\left(-\bar{\gamma} \frac{c}{n} (t_2 - t_1)\right) \rightarrow \bar{\gamma} = -\frac{n [\ln P(t_1) - \ln P(t_2)]}{c (t_2 - t_1)}$$

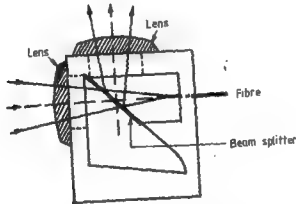
ويبين الشكل رقم (١٠/٦) (رسماً توضيحياً) النظام البصرى الذى استخدمه Costa and Sordo (1977) لقياس التشتت الخلفى .

واستخدم "Costa and Sordo" (١٩٧٧ ب) خلية خاصة موضحة فى الشكل رقم (٧/١٠) لتقليل الانعكاس من سطح الشعيرة الذى يدخل منه الضوء . وتتمثل هذه الخلية بسائل معامل انكساره يساوى معامل انكسار لب الشعيرة ($n_L = n_{\text{core}}$) ، وتحتوى هذه

الخلية على مجزئ لحزمة الأشعة beam splitter ، وتوضع الشعيرة في الخلية من خلال فتحة ضيقة بواسطة micromanipulators .



شكل رقم (٧/١٠) : النظام البصري المستخدم في قياس التشتت الخلفي (من، Costa and Sordo, 1977-b)



شكل رقم (٧/١٠) : خلية يملؤها سائل له معامل انكسار مساو لمعامل انكسار لب الشعيرة يتم بواسطة تقليل الانعكاس للضوء الساقط على طرف الشعيرة (من Costa and Sordo, 1977-b)

References

- Barnoski M K and Jensen S M 1976 *Appl. Opt.* **15** 2112
- Costa B and Sordo B 1977a *CSELT Rep. Tec.* **5** 75
- 1977b *Third European Conf. on Optical Communication, Munich, September 1977*
- Daino B and Sette D 1977 *Eurocon, Venice, May 1977*
- Hartshorne N H and Stuart A 1970 *Crystals and the Polarising Microscope* (London : Edward Arnold) pp 559-63
- Ho P S, Mahric M E and Epstein M 1975 *Appl. Opt.* **14** 2598
- Personick S D 1977 *Bell Syst. Tech. J.* **50** 355
- Presby H M 1974 *J. Opt. Soc. Am.* **64** 280

الفصل الحادى عشر

التحليل الأوتوماتيكي لخريطة هذب التداخل الضوئى

Automatic Analysis of Interferograms

١/١- خطوات تحليل خريطة هذب التداخل

The steps of analysis of interferograms :

التحليل الكمى للصور التى نشاهدنا أو نحصل عليها باستخدام الميكروسكوب الضوئى يحدده قوة إحصار عين الراصد وقدرته الذهنية . وإن تطبيق الالكترونيات الرقمية لتحليل الصور التى نحصل عليها باستخدام الميكروسكوب يبشر بصوت تطوير وتقدم فى المستقبل القريب والوصول الى درجة ومرحلة متقدمة مختلفة تماما عن الحاضر .

قام "Rosen" (١٩٨٤) بتجميع وعرض طرق إدخال الالكترونيات فى مجال الفحص بالميكروسكوب الضوئى ، تناول عرضة بدءا بفحص الأجسام الذى يتم بواسطة الميكروسكوب الضوئى إلى الحصول على صور لها ، ثم تحويلها إلى إشارات رقمية وتخزين هذه الصور ، يلى ذلك تحليل للصور وتسجيل للمعلومات وكتابة النتائج .

ويختتم هذا الفصل بإدخال الالكترونيات فى مجال ميكروسكوبات التداخل الضوئى . فالجسم هنا هو خريطة هذب التداخل interferogram ، سواء كانت هذب تداخل ثنائية أو هذب تداخل متعددة ، أو هذب تداخل ناتجة عن مسار مفرد أو مسار ثنائى . يتم فيه شرح التحليل الأوتوماتيكي لخرائط الهذب واستخلاص برؤفيل معامل انكسار الألياف أى قيم معاملات الانكسار عند كل نقطة على مقطع عرضى للألياف . وقد شمل الفصل على أسماء الباحثين السابقين الذين قاموا بتطبيق التحليل الأوتوماتيكي لخرائط هذب التداخل واستخلاص معاملات انكسار الألياف مع نبذة قصيرة موجزة عن مساهماتهم . هذا بالإضافة إلى تناول المجال بالتفصيل بعد عرض تتابع خطوات إدخال الالكترونيات الذى قدمه " Rosen " (١٩٨٤) فى مجال ميكروسكوبات التداخل الضوئى .

ولقد طور " Wonsiewicz et al " (١٩٧٦) تقنية لاختزال المعلومات من صور هذب التدخل باستخدام هذب التداخل الناتجة من شريحة عرضية من الألياف . وتقوم الطريقة على تحويل هذب التداخل إلى إشارات رقمية باستخدام جهاز الشدة الضوئية الماسح Scanning microdensitometer ، يلي ذلك استخدام الحاسب الآلى لتعيين موقع الخط الذى يمر بمركز أو منتصف كل هذبة ، ثم يتم تحويل هذه البيانات إلى قيم معاملات انكسار وقيمة نصف قطر مقطع شعيرة الألياف وهى بروفيل معامل الانكسار عبر مقطع الشعيرة . كما قاموا بتطوير برنامج الحاسب الآلى المطلوب لتسكين البيانات على أنسب منحنى يتبع دالة أسية .

ولقد استخدم "Presby et al" (١٩٧٨) نظاماً أوتوماتيكياً مكوناً من كاميرا فيديو وحول رقمى وحاسب آلى لمعالجة البيانات التى يخرجهها ميكروسكوب التداخل باستخدام طريقة الشريحة العرضية لشعيرة الألياف . وقد أمكنهم استخلاص بروفيل معامل الانكسار للألياف مندرجة معامل انكسار ليها .

وقام "Boggs et al" (١٩٧٩) وكذلك "Presby et al" (١٩٧٩) ، وأيضاً "Marcuse and Presby" (١٩٨٠) مستخدمين طريقة التداخل الضوئى المستعرض ، حيث تغمر الشعيرة فى سائل له نفس معامل انكسار قشرتها ويضاء بحزمة اتجاهها عمودى على محور الشعيرة . وقد قدموا وصفاً لمكونات نظام بصري يتم بواسطته إجراء قياسات لبروفيل المسار الواحد لأوتوماتيكياً . فلقد استخدم ميكروسكوب التداخل للضوء النافذ "Leitz" الذى يقوم على مسار مفرد وحزمتين ضوئيتين ومعه كاميرا فيديو ونظام لتحليل صور الفيديو . وشملت طريقتهم فى القياس التسجيل باستخدام الفيديو وتحويل صور هذب التداخل إلى رقمية تمت تحكم أو سيطرة الحاسب الآلى .

وطبقاً لما قدمه "Rosen" (١٩٨٤) فإن خطوات العمل وتتابعها فى التحليل الأوتوماتيكى لخراطئ هذب التداخل الناتجة من ميكروسكوبات التداخل هى كما يلى :

- أ- تصميم وتنفيذ مقياس التداخل على قاعدة stage الميكروسكوب .
- ب- الحصول على صورة مكبرة لخريطة هذب التداخل . هذه الصورة المتكونة للهدب

يمكن أن ترى بالإبصار المادى أو تسجل على لوح فوتوغرافى أو تظهر على شاشة تليفزيون ، ويجب أن تستمر فترة زمنية كافية لاستخلاص البيانات الكمية منها .

ج- استخلاص المعلومات العددية من الصورة وتخزينها . ويتم القياس باستخدام graticule عند عدسة العينية أو باستخدام هور مسجلة كمرجع ثم يتم إرسالها إلى آلة حاسبة أو حاسب آلى .

د- تحليل البيانات الناتجة من القياس .

هـ- تسجيل نتائج التحليل .

١/١- الحصول على الصورة Picture acquisition :

يحصل المشاهد من خلال الميكروسكوب - سواء كان ينظر إلى الميكروسكوب أو إلى صورة أو إلى شاشة تليفزيون - يحصل على صورة لمجال الرؤية كاملا من أول وهلة . فاستجابة خلايا الشبكية للمشاهد تتم جميعها آنيا أى فى نفس اللحظة ، وهى فى وضع مواز لمساحة الرؤية المضاعفة . فكاميرا التصوير تسجل صورة المنظر على فيلم حساس by parallel acquisition . وعند استخدام كاميرا التليفزيون يتم تحويل الصورة إلى إشارة كهربائية بطريقة تسمح بقراءتها serially ، كنقطة تتحرك على خط مستقيم ، حيث تتبع فى مسارها خطوطا مستقيمة متتابعة تغطى الصورة .

وحيثما أدخلت بدائل لهذه الطريقة بأجهزة تستخدم كواشف من الصمام الثنائى diode تسمح للتيار الكهربى أو الإشارات بالمرور فى اتجاه واحد فقط ، وقد وزعت على شكل مصفوفة أو مجموعة متراسة يشغل كل كاشف موقعا معينا بترتيب معين ، أو باستخدام مكونات مشحونة Charge coupled devices على شكل مصفوفة .

٢/١- تحويل الصورة إلى أرقام وتخزينها :

Digitisation and storage of the image

بالرغم من أنه يمكن تخزين الصورة إلكترونيا فى شكل تناظري analogue form ، مثلا على شريط فيديو ، إلا أن دائرة اهتمامنا هنا هى النظم التى يتم عن طريقها تحليل الصور ومنها يكون ضروريا تحويل الصورة إلى أرقام قبل تحليلها . وهناك مطلبان لتحويل الصورة

إلى أرقام :

أ- بالنسبة إلى المواقع أى تحديد إحداثى الموقع .

ب- بالنسبة إلى قيمة الشدة الضوئية أى تحديد منسوب الشدة الضوئية عند هذه النقطة

يعنى هذا أن خريطة هذب التداخل المتكونة فى مستوى الصورة بواسطة ميكروسكوب التداخل الضوئى أو باستخدام النظام البصرى الذى يسمح بتكوين هذب التداخل عند الإنفاذ أو عند الانعكاس ، يتم إحلال مجموعة set من الصور النقطية محلها - تسمى هذه الصور النقطية pixels - تلك التى يمكن توصيفها بقيمتى إحداثيين وقيمة الشدة الضوئية لضوء أحادى الطول الموجى عندها ، ويصاحب ذلك معامل التلون chrominance index للهدب المتكونة بالضوء الأبيض . وتتوقف كثافة عملية تحويل الصورة إلى رقمية على عدد الصور النقطية فى وحدة المساحات وعدد مناسيب الشدة الضوئية التى يمكن التفرقة بينها .

التزقيم الفراغى : Spatial digitisation

يتم ترتيب الصور النقطية على هيئة شبكة أو شبكية وتتحدد المساحة المحددة لكل صورة نقطية بالشبكة المكونة من خطوط أفقية ورأسية متقاطعة مكونة لمواقع رباعية الشكل متساوية المساحات ، وأكثر الشبكات استخداماً تكون فى شكل مستطيل . وترتبط قوة التحليل الضوئى التى يمكن الحصول عليها بكثافة الصور النقطية فى الشبكة . والقيمة 500×500 لشبكة مربعة الشكل يمكن اعتبارها أقل قيمة مفيدة .

وفيما يلى اشتقاق تعبير رياضى لعدد الصور النقطية ونرمز له بالحرف p فى خط مستقيم طوله I على الصورة بدلالة عدد العينات المأخوذة F_s sampling frequency . فلكل نقطة على جسم مضاء تم اختيارها بواسطة الميكروسكوب لها نموذج pattern خطوط حيود متكونة فى المستوى الذى تتكون فيه الصورة . فللعنسة التى نافذتها مستديرة circular aperture يحدد خطوط الحيود قرص أيرى Airy disk الذى تغير فيه الشدة الضوئية تبعاً للدالة $(J_1(x)/x)^2$ ، حيث $J_1(x)$ ترمز إلى دالة Bessel للمتغير x من الدرجة الأولى و x هى المسافة من مركز خطوط الحيود .

وقد أنشأ "Hopkins" (١٩٤٣) بأنه يمكن تقريب معادلة أيرى إلى دالة جاولس وهي $\exp(-x^2/2r^2)$ والتي تتمكن من احتواء التثنيات الثانوية أى من الدرجة الثانية التى تظهر عند استخدام عدسات لها اتساع عددى كبير . ويرمز إلى نصف القطر فى دالة جاولس بالرمز r الذى تصل الشدة الضوئية عنده فى صورة خطوط الصيود إلى ١٠٪ من قيمتها عند المنتصف أو المركز .

وتمطى تحويلات فوريير لدالة جاولس طيف التردد الفراغى لخطوط الصيود التى تم تسجيلها - انظر : Eccles et al 1976 - من الواضح أن أى خط على الصورة نحصل عليه عن طريق convolving the pattern of illumination التى تحوى خط عبر الجسم بمجموعة خطوط الصيود الناتجة من نقطة مضيئة . ولقد قدم "Rosen" العلاقة الآتية التى تعطى عدد الصور النقطية p على خط طوله 1 على الصورة :

$$P = 3l / \pi m (0.22\lambda/NA) \quad (11.1)$$

حيث NA هى الاتساع العددي لشيئية الميكروسكوب ، m قوة التكبير ، λ طول موجة الضوء أحادى الطول الموجى المستخدم .

وقدم "Eccles et al" (١٩٧٨a,b) وصفا لنظام مبرمج باستخدام flying spot microscope الذى يمكن عن طريقه الحصول على بيانات عديدة بتحويل الصورة إلى أرقام . وقد استخدم المعادلة الآتية :

$$P = 3l / \pi [r_1^2 + (0.22\lambda m / NA)^2]^{1/2} \quad (11.2)$$

حيث r_1 ترمز إلى نصف قطر scan tube للميكروسكوب الذى عنده تصل الشدة الضوئية I إلى ١١٠ . من قيمتها عند المنتصف والميكروسكوب الذى يستخدم شيئية لها اتساع عددي NA مساو ١,٢٥ وقوة تكبير ١٢٠٠ باستخدام ضوء طوله الموجى λ تساوى ٥٠٠٠ أنجستروم مستخدما شيئية عالية القوة وسائل الغمر oil immersion ويكون صورة عرضها ٥سم فى كاميرا التليفزيون والعدد المناسب للصور النقطية فى كل خط هو p تساوى ٤٥٢ (المعادلة ١١-١) .

هذه الحسابات لا تتضمن أولا تأخذ فى الاعتبار الترشيح الفراغى spatial filtering الذى يدخل عن طريق حزمة الالكترونات التى تقرأ الصورة الكامنة داخل الكاميرا . ولعل

كثافة الصور النقطية التي تصل إلى 256×256 تكون مناسبة للحصول على كل المعلومات المتاحة . وعمليا تمثل قيم الإحداثيات x, y لكل صورة نقطية في النظام الأوتوماتيكي بواسطة صف من البايت (*) bits (صفر ، وحدات) ، فالصف الذي يحوى ٨ بايت يقرر 256 أى قيم عددها 2^8 ، والصف ٩ بايت يقرر ٥١٢ قيمة . ويوجد مكونات أجهزة قياسية صممت لتتعامل مع الصفوف عالية الكثافة التي أطوالها ٨ بايت ، ١٢ بايت ،

هذا ويظهر اتجاه منذ عام ١٩٧٠ عند استخدام النظم الميكروسيكوبية التي تعمل أوتوماتيكيا أن تستخدم شبكة 256×256 من الصور النقطية ، أما الآن فإن شبكات تحتوي على ٩٢ ، ١٢٢ صف وعمود أصبحت متوفرة .

تحويل الإشارة إلى أرقام : Singal digitisation

في جميع الحالات العملية يوجد حد أعلى لعدد مناسب الشدة الضوئية التي نحتاجها لترقيم إشارة وباستخدام الرياضيات التي تقوم على استخدام رمزين رقميين هما الصفر والواحد (1,0) يمكن تمثيل أو وصف الإشارة بصف من عدد m بايت قابل للتقسيم إلى عدد N مناسب ، حيث $N = 2^m$. فإذا كانت النسبة بين الإشارة إلى الضوضاء signal to noise في الكاشف $\frac{S}{N} = 1.4 \cdot \left(\frac{m}{n}\right)$ ، هذه العلاقة قد وصل إليها "Billingsley" (١٩٧١) . والأجهزة الإلكترونية الحساسة $\frac{S}{N}$ التي تعمل بقيمة تساوى 100 ، $N = 71$ منسوبا ، يحتاج التعبير الترقيم الثنائي إلى عدد ٧ بايت تعبر عن ١٢٨ منسوب . وعند استخدام ميكروسيكوب تليفزيوني يعمل بقيمة $\frac{S}{N} = 300 : 1$ ، $N = 214$ فإن هذا يحتاج إلى شفرة أو كود يحوى ٨ بايت .

تخزين الصورة : Storage of the image

يمكن تخزين الصور على ألواح فوتوغرافية أو على أشرطة فيديو . وكان نتيجة التقدم في الدوائر المتكاملة integrated circuitry وتوفر أقراص تخزين بجميع المقاسات ، أنه أصبح ممكنا تخزين مكتبات كبيرة من الصور على هيئة أرقام . فإذا حولنا صورة إلى

(*) وكلمة bit بايت مصطلح مختصر مكون من الحرف الأول من الكلمة الأولى والحرفين الأخيرين من

الكلمة الأخيرة من العبارة الآتية :

Binary digit . وتعني رقما ثانيا (0,1) ، ويطلق هذا التعبير على موقع صغير كاف لتمثيل رقم ثنائي .

شبكة من الصور النقطية أى تجزئتها إلى 12×12 صورة نقطية وأن الإشارة ضوئية لكل صورة نقطية قد أمكن تحويلها إلى شفرة أو كود يمثلها كلمة تقوم على ٨ بايت ، السعة المطلوبة لتخزين الصورة بأكملها هو 0.25 Mbyte أى ٢٥٠ مليون بايت - البايت يعنى موقع تخزين مكون من عناصر ثنائية - فمجموعة من المواقع الثنائية ينظر إليها كوحدة متكاملة تتكون فى معظم النظم من ثمانية مواقع 8 bits ، وبعض النظم ١٦ موقعا أو ٣٢ موقعا وإن كان المستخدم منها فى تمثيل رمز من رموز البيانات الرقمية ٨ مواقع فقط .

والبايت هو المواقع الكافى لتخزين رمز واحد فقط من رموز البيانات . والسعة السابق ذكرها تغطى كمية هائلة من المعلومات مساوية لمحتويات الكتاب متوسط الحجم ، لكن أقراص التخزين حتى القرص المرن الصغير Floppy disk يمكن ان يخزن بيسر هذه الكمية من البيانات . إن امكانية الاحتفاظ بالصورة فى ميكروسكوبات التداخل الأوتوماتيكية ضرورة هامة . الاحتفاظ بها فى مخزن حيث تكون صالحة لاستخلاصها وتحليلها فى ذاكرة التوصل العشوائى وهى الذاكرة التى يتم التوصل إلى أى موقع مباشرة دون اتباع تدرج أو تسلسل معين ، سواء من أجل الإدخال أو الإخراج يعنى هذا الاحتفاظ بها فى وحدة أو جهاز تخزين ذى مواصفات وتصميم يسمح باستخدامه لتخزين بيانات تم تنظيمها بأسلوب التوصل المباشر أو العشوائى وهى الخازنة ذات الوسيط التى تجعل جميع مواقعها متاحة للتوصل المباشر دون ترتيب وبحيث لا يؤثر أو يرتبط توقيت التوصل بمواقع البيان على الوسيط (R. A. M) .

ويمكن الآن العمل بذاكرة توصيل عشوائى سعتها تصل إلى عدة ملايين بايت Mega bits .

١١/٢- تحليل الصور : التحليل الأوتوماتيكي لخريطة مدب التداخل واستخلاص بروفيل معامل الانكسار للآلياف باستخدام طريقة التداخل الضوئى للشريحة العرضية :

Picture analysis : automatic analysis of interferograms and deduction of the index profile of fibre using the interferometric slab method

قدمنا فى الفصل الخامس النظرية التى تقوم عليها طريقة التداخل الضوئى لشريحة

عرضية لشعيرة . ويمكن اشتقاق تعبير رياضي يربط بين معامل الانكسار للب الشعيرة ونرمز له $n(x,y)$ وإزاحة الهدبة ونرمز لها $S(x,y)$ كما يلي :

$$n(x,y) = n_{\text{clad}} + \frac{\lambda S(x,y)}{D} \quad (11.3)$$

حيث D ترمز إلى البعد بين هبتي متعاقبتين ، t سمك الشريحة .

يمكن قياس إزاحة الهدبة باستخدام ترعيج في عينية الميكروسكوب وحساب معامل الانكسار من المعادلة (١١-٢) باستخدام برنامج حاسب آلي ، أو قياس إزاحة الهدبة المسجلة على لوح فوتوغرافي لصورة الهدب المتكونة من خلال الميكروسكوب تبعاً لما أفاد به "Wonsiewicz et al" (١٩٧٦) و "Presby et al" (١٩٧٨) وتقوم طريقة Wonsiewicz et al على تعيين مجموعة الإحداثيات الكرتيزية Cartesian coordinates التي تصف شكل هدب التداخل .

وتم التحديد الأوتوماتيكي لواقع هدب التداخل بالطريقة الآتية المشروحة في شكل رقم (١١/١):

١- تحويل الفيلم إلى صورة رقمية وتسجيلها كشفرة على شرائط غير مغناطيسية بواسطة فكسميل^(*) Facsimile وهو نظام نقل الصور إلكترونياً من بعد .

ب- يتم قراءة الشريط الممغنط باستخدام حساب إلى متعدد الأغراض وتحديد موقع الهدب .

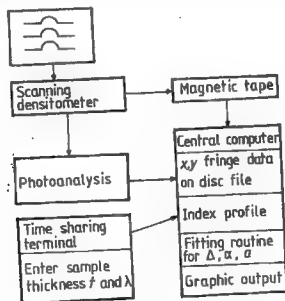
ج- تدون قيم الإحداثيات y,x للهدب على ملف قرص الذاكرة لاستخدامها في الخطوات اللاحقة .

وتحويل خريطة هدب التداخل إلى شفرة يتطلب استخدام جهاز ماسح لقياس الشدة الضوئية ودرجة السواد Scanning microdensitometer ذي كفاءة عالية ، وقوة

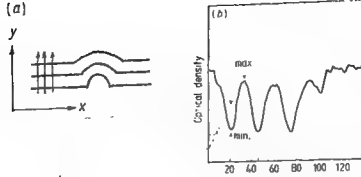
(*) نظام فكسميل هو نظام استخدام شبكات الاتصال الصوتية في نقل النقط الضوئية المكونة للصور والرسومات من الورق بواسطة جهاز يقوم بتحويلها إلى نبضات قابلة للنقل بواسطة خط التليفون العادي بعد إضافة تجهيزات خاصة ، ثم نقلها من خلال شبكة الاتصال المزودة بحاسب آلي للتحكم والتوجيه إلى الطرف المقصود من الشبكة حيث يستقبلها جهاز مماثل لجهاز الإرسال يقوم بتحويل النبضات إلى صورة أو بيان أو رسم مماثل تماماً للأصل .

الفصل R.P. ٤٠ خط في المليمتر ومنسوب gray scale هو ٢٥٦ منسوباً . ويتم تشفير الصورة بلمصق الفيلم الشفاف إلى سطح اسطوانة تدور ، فتقوم حزمة الأشعة الضوئية الثانية بمسح الفيلم . ويتم تسجيل الشدة الضوئية النافذة بواسطة كاشف ضوئي ، وتظهر كمتوالية من عدد n من الأعداد الصحيحة تتراوح بين صفر ، ٢٥٥ التي تتناسب مع الكثافة الضوئية لكل نقطة من النقاط n على الفيلم . ويعاد مسح الفيلم خطاً بعد خط ليغطي المساحة المطلوبة من خريطة هذب التداخل . ويتم المسح للهدب باستخدام أقل قيمة لقوة الفصل المتاحة وهي ١٠ خط لكل مليمتر مع تسجيل ٢٢٠ نقطة لكل خط و ٢٥٠ خط لكل خريطة هذب . ويتم عملية التعرف والحصول على الهدب بمسح الفيلم عمودياً على اتجاه الهدب . والشكل رقم (٢/١١) لخط تم تشفيره بواسطة جهاز فكسميل facsimile device ويمثل تغير الكثافة الضوئية مع موقع البروفيل . وتقع الهدب على خط مسح معين .

وحصيلة برنامج تعيين مواقع الهدب هو مصفوفة من x, y لمركز الهدب تحت الفحص والشكل رقم (٢/١١) يبين رسماً لهذه المصفوفة ويتم تخزين بيانات المصفوفة على ملف قرص ، ويكون ذلك المخرجات للبرنامج الذي يتم عن طريق حساب بروفيل معاملات الانكسار



شكل رقم (١/١١) : رسم تخطيطي لطريقة التحليل الأتوماتيكي



شكل رقم (٢/١١) : (أ) يبين نتيجة مسح الھب في الاتجاه الموضع منحني الكثافة الضوئية وتغيرها مع قيم λ في (ب)

٢/١١- حساب بروفيل معامل الانكسار :

Calculation of the index profile

يتم حساب بروفيل معامل الانكسار $n(r)$ من قيم x, y ، حيث $n(r)$ تمثل معامل الانكسار عند بعد r من مركز لب الشعيرة مطروحا منه معامل انكسار قشرتها ، وذلك باستخدام برنامج تفاعلي أو جوارى $interactive^{(*)}$ ، ويتم ذلك عن طريق اتباع الخطوات الثلاث الآتية :

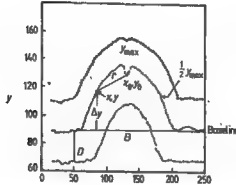
أ- خط أساسي أو الأساس Base line لحساب Δn ، ويتم تعيين قيمة الإحداثي y للمناظرة للمعامل n_{clad} لكل هدبة مختارة ، وتستخدم قيمة الإحداثي y للقشرة للهدبة المركزية كخط الأساس لتعيين إزاحة الھب Δy ، كما هو موضح في الشكل رقم (٣/١١) ، وكذلك قيمة y لمعامل انكسار القشرة لكل هدبة مختارة لتعيين زاوية ميل مقياس التداخل ، والذي منه يحسب البعد بين أى هدبتين متعاقبتين D في المناطق التي يكون فيها معامل الانكسار منتظم القيمة .

ب- تعيين موقع محور الشعيرة (مركز أو منتصف قلب الشعيرة (x_0, y_0)) : يمكن تعريف النقطة x_0, y_0 بأنها منتصف أو مركز الإحداثيات x التي عندها $y = \frac{1}{2} y_{max}$ وتعيين موقع (x_0, y_0) يمكن حساب البعد r من محور الشعيرة عند كل نقطة (x, y) على الهدبة المركزية من العلاقة $r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$ وتقاس r بوحدات ميكرون مع

أخذ قوة تكبير الميكروسكوب فى الاعتبار .

ج- تعيين بروفييل معامل الانكسار : يتم تعيين كل من إزاحة الهدب Δy وقيمة نصف القطر r لكل نقطة (x,y) على الهدبة المركزية . ويحسب قيم $\Delta n(r)$ بدلالة البعد D بين أى هبتين متعاقبتين ، وسك الشريحة t وطول موجة الضوء أحادى الطول الموجى λ من العلاقة :

$$\Delta n(r) = \frac{\Delta y \lambda}{D r} \quad (11.4)$$



شكل رقم (٣/١١) يبين مصفوفة قيم (x,y) لموقع الخط المركزى لكل هدبة الذى تم تعيينه من برامج التحليل الضوئى

ويعطى شكل (٤/١١) بروفييل معامل الانكسار . والمنحنى الكامل هو لقيم أقل مريعات ليتفق fit مع المعادلة :

$$\Delta n(r) = \begin{cases} \Delta n_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right] & r < a \\ 0 & r \geq a \end{cases}$$

والسبب فى انخفاض قيمة معامل الانكسار عند منتصف الشعيرة ناتج من فقد GeO_2 من الطبقات الداخلية لب الشعيرة ، وهو مكون من $GeO_2 - SiO_2$ أثناء الطريقة الكيميائية المعدلة القائمة على ترسيب البخار MCVD لإنتاج الألياف الضوئية ، ويسمى هذا الانخفاض بالفجوة المركزية Central dip .

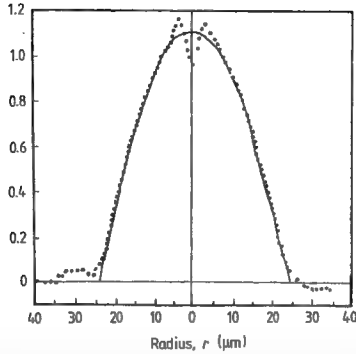
(*) نظام الحاسب الألكترونى يعمل بنظام تشغيل ، يتيح للمستخدم الاتصال المباشر بالحاسب والتعامل معه بأسلوب حوارى ، حيث يتم إدخال متغيرات البيانات بواسطة عبارات أمره ، يدخلها المستخدم وتصله إجابة النظام عليها بصورة فورية .

وقد استخدم "Presby et al" (١٩٧٨) كاميرا فيديو ، ومرقم digitiser ، وحاسب desk computer ، محولة الصور إلى أرقام كما هو موضح فى الشكل رقم (٥/١١) لمعالجة الناتج أو المخرجات من ميكروسكوب التداخل مباشرة بتطبيق طريقة التداخل الضوئى من الشريحة العرضية . وتعمل كاميرا الفيديو خلال ميكروسكوب التداخل وترسل إشاراتنا الكهربائية إلى مرقم الذى يعمل عمل محول تناظرى رقمى analog-to-digital converter(*) بدرجة دقة تساوى ٨ بايت بعد تحديد نقط معينة مختارة فى مجال رؤية الفيديو ، يتحكم برنامج الحاسب الآلى فى اختيار النقط ويتم استجماع البيانات كما يلى :

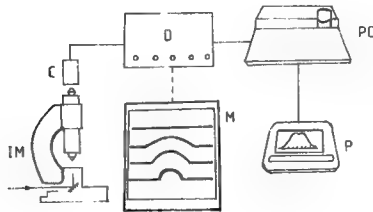
يوجه الحاسب المرقم ليجمع بيانات الشدة الضوئية على خطوط مسح متعاقبة فتقع النقط المختارة على خط رأسى قريب من مركز القطع المكافئ ، ويقوم المرقم بأخذ عينات الشدة الضوئية على خط رأسى قريب من مركز لب الشعيرة فالمنحنى المتموج الموضح فى شكل (٦/١١) يمثل تغير الشدة الضوئية على خط رأسى . ويعين الحاسب الآلى مواقع الهدف بأن يبحث عن موضع النهاية الصغرى للشدة الضوئية عن طريق مواقع عدد من النقط حول النهاية الصغرى باستخدام طريقة أقل المربعات والتي تقع على قطع مكافئ . ثم يوجه الحاسب الخط الرأسى ليجمع معلومات على جانبي لب الشعيرة التى تستخدم لتعيين البعد بين أى هدفين متعاقبتين . ثم يتحرك الخط الرأسى بخطوات مقيدة لقياس إزاحة الهدف التى هى دالة للإحداثى x فى اتجاه نصف القطر مقاسا من منتصف لب الشعيرة أى مركزها ، والدالة الناتجة ونرمز لها بالرمز $S(H)$ هى Δy وتستخدم فى حساب $n(r) - n_{clad}$ طبقا للمعادلة (٤/١١) . وفى النهاية ترسل النتائج لتوزيع معامل الانكسار لجهاز رسم المنحنيات .

(*) محور تناظرى رقمى هو جهاز يستقبل النبضات التناظرية analogue signals الصادرة من الحاسب التناظرى analogue computer ، ويخرجها فى هيئة نبضات رقمية صالحة كمدخلات الحاسب الرقمى .

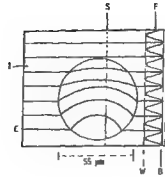
والحاسب القياسى أو التناظرى هو جهاز إلكترونى تم تصميمه لأداء مهمة معينة متكررا بما يطرأ على مستويات الظواهر التناظرية من تغيرات كالتى تطرأ على مستوى قوة ظاهرة معينة مثل قياس درجة حرارة مادة واتخاذ قرار عند وصولها إلى مستوى معين يتم تحليده مسبقا .



شكل رقم (٤/١١) : بروفيل معامل الانكسار المعين باستخدام الطريقة الأوتوماتيكية لتحليل خريطة هذب التداخل الضوئي . ويوضح المنحنى المستمر الاتفاق مع المعادلة بطريقة أقل المربعات (least squares fit) ($\alpha = 1.97$, $\Delta = 0.0076$, $r_{\text{core}} = 24.0 \mu\text{m}$)



شكل رقم (٥/١١) : يبين الأجهزة المستخدمة لإجراء عملية تعيين بروفيل معامل انكسار عبر شعيرة أوتوتيكيا باستخدام ميكروسكوب تداخل ضوئي يقوم على مسار مفرد ، IM ميكروسكوب التداخل ، C كاميرا فيديو ، D مرقم فيديو ، M شاشة العرض ، PC حاسب مبرمج ، P راسم للمنحنيات



شكل رقم (١١/١) : يوضح طريقة التداخل باستخدام هذب التداخل الثنائي الناتجة من شريحة متساوية السمك عرضية لشعيرة متدرجة معامل انكسار لها . S يمثل خطا رأسيا يقطع هذب التداخل ويتحرك اسبح خريطة الهدف ، C مؤشر الشاشة CURSOR (وهو العلامة المضيئة التي تتأخذ شكل مربع أو خط مقيد يظهر على شاشة العرض المرئي لتحديد موضع ظهور المعلومة الجنيدة) ، F تغير الشدة الضوئية على الخط الرأسى . ويظهر السائل الذى معامل انكساره مساو لمعامل انكسار القشرة عند I (المرجع الأبيض B، المرجع الأسود)

٣/١١- التحليل الأوتوماتيكي لخريطة هذب التداخل واستخلاص بروفيل معامل انكسار الشعيرة باستخدام هذب التدخل المستعرضة :

Automatic analysis of interferograms and deduction of the index profile of fibres using a transverse interference pattern :

تم فى الفصل الثالث اشتقاق تعبير رياضى لعلاقة إزاحة الهدف S (y) ومعامل الانكسار $n_m(r)$ فى الصيغة الآتية :

$$S(y) = \frac{2D}{\lambda} \int_y^R \frac{\Delta n_m(r) r dr}{(r^2 - y^2)^{1/2}} \quad (11.5)$$

وباستخدام تماكس أبيل نحصل على :

$$\Delta n_m(r) = n_m(r) - n_{clad} = -\frac{\lambda}{\pi D} \int_r^R \frac{dS(y)}{dy} \frac{dy}{(y^2 - r^2)^{1/2}} \quad (11.6)$$

وقد قدم Boggs et al (١٩٧٩) وكذلك "Presby et al" (١٩٧٩) وصفا لطريقة أوتوماتيكية لاستخلاص بروفيل معامل الانكسار عبر شعيرة متدرج معامل انكسار لهما مستخدمة هب التداخل الثنائي التي حصلوا عليها نتيجة إضاءة الشعيرة بحزمة ضوئية عموديا على اتجاه محورهما . وفى هذه الطريقة يتم انكسار الضوء الساقط عند السطح الخارجى لقشرة الشعيرة ، وتكون لإزاحة الطور الإضافية والانكسار الناتجين من لب الشعيرة دور ثانوى . لهذا يصبح من المفيد إزالة تأثير القشرة بغمر الشعيرة فى سائل له نفس معامل انكسارها n_{clad} . يمر كل شعاع فى المناطق التى معامل انكسارها متغير ويعبر عن طول المسار OPL بالتكامل $\int_{s1}^{s2} n(S) dS$. هذا المتغير S هو طول المسار مقاسا على الشعاع . تغمر الشعيرة فى قطرة من السائل الذى معامل انكساره مساويا لمعامل انكسار القشرة والذى تغمر فيه شبيثة الميكروسكوب . هذه هى المكونات الموجودة فى أحد ذراعى ميكروسكوب التداخل فى حين أن الذراع الآخر يحتوى على قطرة من السائل الذى معامل انكساره n_L مساو n_{clad} :

$$n(r) - n_L = - \frac{\lambda}{\pi D} \int_r^R \frac{dS(y)}{dy} \frac{dy}{(y^2 - r^2)^{1/2}} \quad (11.7)$$

باستخدام المعادلة السابقة يمكن حساب قيم معامل الانكسار وتوزيعها عبر مقطع الشعيرة باستخدام برنامج حاسب ألى يتناول قيم إزاحة الهدف الناتجة من الإضاءة المستعرضة للشعيرة باستخدام ميكروسكوب التداخل الذى يقوم على مسار مفرد . وللمعالجة البيانات ، أى قيم إزاحة الهدف ، يتطلب إجراء تفاضل يليه تكامل طبقا للمعادلة (٧/١١) .

ولقد قام "Boggs et al" (١٩٧٩) بقياس بروفيل معامل الانكسار بغمر شعيرة طولها حوالى سنتيمتر واحد فى سائل المضاهاة matching index oil ، ووضعت المجموعة فى طريق مسار الضوء فى أحد ذراعى ميكروسكوب تداخل نافذ للضوء Leitz ذى الشعاع المزوج والمسار المفرد ، كما وضع سمك معائل من سائل المضاهاة فى الذراع الآخر أى النزاع المرجع ، واستخدم ضوء أحادى الطول الموجى حيث $\lambda = 0.9\mu$ ، $n_L = 1.457 \pm 0.0005$.

وقد وجد أن تسخين السائل لتتم المضاهاة أى تساوى معاملى الانكسار $n_L = n_{cold}$ ليس ضروريا . وخطوات العمل هى نفس الخطوات التى أجراها "Wonsiewicz et al"

(١٩٧٦) وكذلك "Presby et al" (١٩٧٨) وهي موصفة بالشكل رقم (٥/١١) ، وهي تشمل تسجيل فيديو وتحويل صورة هيب التداخل إلى رقمية تحت سيطرة وتحكم برنامج الحاسب الآلى . وقد تم استخدام كاشف من السليكون المنشط بشعة تحت الحمراء كفيكون . ثم ترسل إشارات الفيديو إلى فيديو محول إلى رقمية له صلاحية معالجة وتشغيل عناصر الصورة أى الصور النقطية فى إطار التلفزيون (*) Television frame ويقوم المرقم بفصل ٤٨٠ عنصر صورة أى صورة نقطية على محور y وعدد ٥١٢ عنصر على المحور x ويتم الحصول على قيم x, y كمخلات بواسطة نظام اتصال مزوج الاتجاه يسمح بإرسال واستقبال أى يقوم على ١٦ - بايت مخلات إلى مخرجات (٠/١) عن طريق وصلة بينية إلى حاسب آلى رقم 9825 A هيليويد - باكر .

16-bit duplex(**) input / output (I/O) interface(***) of a Hewlett-Packard 9825 A computer

ويتم التحويل إلى شفرة ٨ بايت أو ٢٥٦ منسوب gray ويستقبل فيديو مرقم بواسطة حاسب ٨ بايت ثنائى (١) على التوازي . ويتصل المرقم بشاشة عرض فيديو تسمح بمشاهدة المنظر الذى يتم معالجته ومراقبة الشفرة على نفس الشاشة ، وهدف عملية التشفير هو تجميع الشدة الضوئية المناظرة لنقاط معروف مواقعها ، وبالتالي يمكن تعيين إزاحة الهدية من بداية القشرة بقية كدالة للبعد من مركز الشعيرة . وتعيين إزاحة الهدية ، يحسب الحاسب الآلى Δn بواسطة طريقة تعرف بطريقة معامل الانكسار الدائرية ، وتقدم هنا نبذة عنها ثم نرسم بيروفييل معامل الانكسار مع الإحداثيات باستخدام راسم xy ويعين الحاسب

* إطار ، صورة إشارة إلى وحدة معلومات مثل صفحة بيانات على شاشة العرض الحزنى ، ويستخدم هذا التعبير أيضا للإشارة إلى المسار فى الشريط المغلف باعتباره إطار للمواقع الثابتة .

** نظام اتصال يسمح بانتقال الإشارات فى الاتجاهين فى نفس الوقت . أى إرسال واستقبال أى .

*** هو جهاز يبنى أو وصلة بينية إشارة إلى قناة الوصل التى تحقق الربط بين المعالج المركزى والمعالجات الخاصة بنظام الحاسب الآلى أو توصيل أى جهازين أو جزئين من أجزاء أى نظام آلى .

(١) إشارة إلى أسلوب تتألف جميع عناصر وحدة البيانات على التوازي أى متزامنة (فى نفس الوقت) دون تتابع أو ترتيب بينها ، وهو فى هذه الحالة يشير إلى نوع من الحالات أو الأشياء كما فى نظام الترقيم الثنائى حيث يستخدم رقمان فقط هما (١,٠) ومثل حالة مصباح كهربى إما مضى أو مطلقا

الآلى أكثر المنحنيات اتفاقا وقيمة الدالة الأسية التى تعبر عنه ، ونستخلص قيمة α فى المعادلة الأصلية لبروفيل الانكسار للألياف متدرجة معامل انكسار ليها .

وكما شرحنا ، تتم معالجة أوتوماتيكية لمخرجات الميكروسكوب باستخدام نظام يقوم على فيديو - مرقم - حاسب إلى متحكم مسيطر ، ونحصل على بروفيل معامل الانكسار عن طريق حل المعادلة التكاملية . والنتائج التى يتم الحصول عليها تكون reproducible إلى حوالى ١٪ ويمكن تعيينها فى مدة تصل إلى بضع دقائق من إنتاجها تتفق مع التوزيع المطلوب المثالى Optimam .

وقد أفاد "Presby et al" (١٩٧٩) بأن الحل الكامل للمعادلة التكاملية رقم (٧/١١) يمكن من استخلاص قيم $n(r)$ عند كل نقطة تبعد r عن مركز لب الشعيرة من إزاحة الهدبة $S(y)$ وذلك بإجراء تفاضل ثم تكامل . ولما كانت إزاحة الهدبة معلومة عند مواقع محددة فقط ، فإنه تستخدم الحلول العددية numerical techniques المقربة للتفاضل وكذلك للتكامل . ويتوقف درجة الدقة فى نتائج بروفيل معامل الانكسار على درجة الدقة فى قياس $S(y)$ ، على كثافة النقط التى يتم قياس $S(y)$ عندها والطرق المستخدمة فى الحسابات العددية ودقتها .

من طريقة التحليل التى قام بها "Boggs et al" (١٩٧٨) والتى تعرف بطريقة المعامل الدائرى ، افترض أن الأشعة تمر خلال لب الشعيرة دون انعطاف وأن طورها يتأخر تبعا لطول مسار الضوء . بالإضافة افترض أن الشعيرة تتكون من عدد كبير من الحلقات متحدة المركز ، معامل انكسار كل منها ثابت ، وقد أمكنهم حساب معامل الانكسار خطوة - خطوة ، بادئين بالحلقة الأولى ومتجهين نحو المركز أو المنتصف ، إذ أنه يمكن حساب معامل انكسار أية حلقة إذا كانت قيم معاملات انكسار الحلقات التى تسبقها سبق معرفتها .

وينبغى أن نذكر أنه فقط فى حالة التداخل الضوئى التفاضلى differential interference-rometry مثلا عند استخدام مقياس التداخل لماخ وزندر مع وجود جهاز قص shearing - كما أوردنا فى الفصل الثالث - أن توزيع معامل الانكسار تعطيه مباشرة المعادلة رقم (٧/١١) كما يلى :

$$\Delta n(r) = -\frac{\lambda}{\pi D_s} \int_r^R S(y) \frac{dy}{(y^2 - r^2)^{1/2}} \quad (11-8)$$

حيث ترمز S إلى الإزاحة العرضية بين الشعاعين وفي هذه الحالة لا نحتاج إلى المعامل التفاضلي .

وفي الخاتمة ، نقول بأن النظام الذي يشمل ميكروسكوب التداخل ، وفيديوكون كاميرا ، ومراقم فيديو وشاشة عرض ، وحاسبا مبرمجا ورأسا للمنحنيات - مناسب لإجراء عملية التعيين الأوتوماتيكي لبروفيل معامل انكسار الألياف عند تطبيق طريقة التداخل القائمة على الهدف المتكونة من شريحة مستعرضة من الشعيرة ، أي طريقة التداخل المستعرضة ، وكذلك عند تناول هدف التداخل الثنائي أو هدف التداخل المتعدد ، وكذلك ميكروسكوبات التداخل القائمة على المسار المفرد والمسار المزدوج .

وفي كل حالة نحصل على خريطة لهدف التداخل ونسجلها وترى من خلال كاميرا فيديو ، إلى ذلك مراقم فيديو وشاشة عرض ، ومن الواضح أن طرق الحصول على هدف التداخل تختلف في فرق طول مسار الأشعة التي تتداخل وبالتالي في العلاقات التي تربط معامل الانكسار وإزاحة الهدف ، ويحتاج ذلك إلى البرنامج المناسب لاستخلاص بروفيل معامل الانكسار للشعيرة ، وفي حالة خريطة هدف التداخل الناتجة من استخدام شريحة عرضية من الشعيرة توجد علاقة خطية بين $\Delta n(r)$ وإزاحة الهدف Δy تعبر عنها المعادلة رقم (١١-٤) ، في حين أنه في حالة نظام التداخل التي تسقط حزمة الأشعة وحيدة الطول الموجي المتوازية على الشعيرة عموديا على اتجاه محورها transverse interference systems تتبع العلاقة بين $S(y)$ ، المعادلة التكاملية رقم (١١-٧) ، معادلة تماكس أبيل Abel's integral equation . ويوضح حلها أن $\Delta n(r)$ عند أية نقطة على لب الشعيرة يمكن الحصول عليها من إزاحة الهدف $S(y)$ بإجراء التفاضل أولا يعقبه التكامل . وفي التداخل التفاضلي نحصل على توزيع معامل الانكسار بطريقة مباشرة من معادلة التكامل التي لا تتطلب إجراء تفاضل مسبق .

References

- Billingsley F D 1971 Digitization and storage of the image in *Advances in Optical and Electron Microscopy* ed. R Barer and V E Cosslett vol. 4 (London: Academic) pp 127-70
- Boggs L.M, Presby H M and Marcuse D 1979 *Bell Syst. Tech. J.* **58** 867
- Eccles M J, McCarthy B D and Rosen D 1976 a *J. Microsc.* **106** 33
- 1976b *J. Microsc.* **106** 43
- Hopkins H H 1943 *Proc. Phys. Sco.* **55** 116
- Marcuse D and Presby H M 1980 *Proc. IEEE* **68** 676
- Presby H M, Marcuse D and Astle H W 1978 *App. Opt.* **17** 2209
- Presby H M, Marcuse D, Astle H W and Boggs L M 1979 *Bell Syst. Tech. J.* **58** 883
- Rosen D 1984 Instruments for optical microscope image analysis in *Advances in Optical and Electron Microscopy* ed. R Barer and V E Cosslett vol. 4 (London: Academic) pp 323-45
- Wonsiewicz B C, French W G, Lazay P D and Simpson J R 1976 *Appl. Opt.* **15** 1048.

المصطلحات العلمية

Abel inversion	تماكس أبيل
Achromatic fringe	هدبة لالونية
Acrilan fibres	ألياف الاكريلان
Airy formula	صيغة ايرى
Airy summation	تجميع ايرى
Amplitude	سعة
Anisotropic fibres	ألياف متباينة الخواص الضوئية
Aperture numerical	الانتساع العددي
Attenuation coefficient	معامل الاضمحلال
	تحليل اتوماتيكي لخريطة هذب
Automatic analysis of interferograms	التداخل الضوئي
Avogadro's number	عدد افوجادرو
Axes optic of crystal	المحور البصري للبلورة
Babinet compensator	معادل بابينيت
Back-scattering from fibres	التشتت الخلفى من الألياف
along fibre axis	فى اتجاه محور الشعيرة
perpendicular to fibre axis	فى الاتجاه العمودى على محور الشعيرة
Back-Scattering measurement	قياس التشتت الخلفى
Beam splitter	مجزء حزمة الأشعة
Becke-line method	طريقة الحد الفاصل لبيك
Bessel function	دالة بسل
Biaxial crystal	بلورة ثنائية المحور
Bi-prism Fresnel's	المنشور المزدوج لفرنيل
Birefringence	الانكسار المزدوج
accuracy of measurement	دقة القياس
lateral	الجانبى (العرض)

measurement	قياسى
radial	فى اتجاه نصف القطر
Birefringent prism	منشور الانكسار المزدوج
Bond polarisability	استقطابية الروابط الكيميائية
Cashmeline fibres	ألياف الكاشميرولون
Cauchy's dispersion of fibres	صيغة التفرق الضوئى لكوشى
Chemical vapour deposition, Modified	الطريقة الكيميائية المعدلة لتكوين الألياف
	بترسيب الأبخرة
Coherence length	طول الترابط
Core of fibres	لب الشعيرات
Cotton fibres	ألياف القطن
Courtelle fibres	ألياف الكورتيل
Crystal	بلورة
growth features	معالم النمو البلورى
silicon carbide	كربيد السيليكون
topography	تضاريس السطح
Damage in fibres by γ -rays	الإتلاف فى الألياف بأشعة جاما
by neurons	بالنيوترونات
Digitisation	ترقيم
image	تحويل الصورة إلى أرقام
signal	تحويل الإشارة إلى أرقام
spatial	فراغى
Digitiser	مرقم
Dispersion of spectrograph	تفرق المطاياف
Division of amplitude	تقسيم السعة
Division of wavefront	تقسيم جبهة الموجة
Double refraction	الانكسار المزدوج
Dralon fibres	ألياف الدرالون

Draw ratio	نسبة السحب
Polypropylene fibres	ألياف البولي بروبيلين
Fabry-Perot interferometer	مقياس التداخل لفابري وبير
Feussner surface	سطح فايزنر
Fibres	ألياف
anisotropic	متباينة الخواص
diameter determination	تعيين القطر
dispersion properties	خاصية التفرق الضوئي
effect of γ -irradiation	تأثير التشعيع بأشعة جاما
flax	الكتان
gamma irradiation	التشعيع بأشعة جاما
heterogeneous	ألياف غير المتجانس
highly oriented	ألياف انتظمت غالبية جزيئتها في اتجاه محورها
homogeneous	ألياف متجانسة
homogeneous cylindrical	ألياف إسطوانية متجانسة
irregular transverse sections	مقاطع عرضية غير منتظمة
multilayer	متعدد الطبقات
natural	ألياف طبيعية
optical	ألياف بصرية
physical properties	الخصائص الفيزيائية
opto-mechanical	الخصائص الضوئية - الميكانيكية
opto-thermal	الخصائص الضوئية - الحرارية
radius determination	تعيين نصف قطر الشعيرة
refractive index determination	تعيين معامل انكسار مادة الشعيرة
regular transverse sections	مقطع عرضي منتظم
skin-core structure	قشرة ولب الشعيرة
steam stretched acrylic	ألياف الاكرليك المشدودة في جو من البخار
structure	تركيب

surface topography	تضاريس السطح
synthetic	ألياف تركيبية
Fibrous materials	الألياف
Fizeau fringes	هدب التداخل الضوئي فيزيو
localised	محددة الموقع
multiple-beam	متعددة الأشعة
shape	شكل الهدب
Fizeau method	طريقة فيزيو
Fresnel biprism	المنشور المزدوج لفرنيل
Fringe pattern	توزيع الشدة الضوئية
intensity distribution	في مجموعة هدب
Fringes	هدب
equal chromatic order	هدب تساوي الرتبة اللونية
equal tangential inclination	هدب تساوي ميل المماس
equal thickness	هدب تساوي السمك
multiple beam formation	تكوين هدب التداخل المتعدد
analysis of elements	تحليل عناصر التكوين
at reflection	عند الانعكاس
in transmission	عند النفاذ
intensity distribution	توزيع الشدة الضوئية
localisation	موقع الهدب
phase lags	تخلف الطور
silvered liquid wedge with fibre inserted	مسطحان ضوئيتان مفضضان يميل أحدهما على الآخر يحصران سائل غمرت فيه شعيرة
visibility	تباين الهدب
zero-order	الهدبة الصفيرية
Fourier transform of the Gaussian function	تحولات فوريير لدالة جاوس

Gabor reconstruction of wavefronts	إعادة بناء جبهات الموجة لجابور
Graded index optical fibres	ألياف بصرية معامل انكسار لها يقل مع البعد عن مركز الشعيرة
Graded index profile	بروفيل معامل انكسار الألياف
Grating spectrograph	مطياف محزوز الحيود
Group velocity	سرعة المجموعة
Hartman's formula	صيغة هارتمان
Highly oriented fibres	ألياف ذات انكسار مزبوج عال
Hologram	هولوغرام
Holographic interferometry	التداخل الضوئي الهولوغرافي
Holography	الهولوغرافيا
Huygen's principle	مبدأ هايجنز
Image splitting	انقسام الصور
Index profile of fibres	بروفيل معامل انكسار الألياف
calculation	حساب
step-pyramid like	على شكل هرمي مدرج
Intensity distribution in fringe	توزيعاً لشدة الضوئية لهذب
multiple-beam at reflection	التداخل الضوئي المتعدد
multiple-beam in transmission	عند الانعكاس وعند النفاذ
two-beam	التداخل الثنائي
Interference fringes	هذب التداخل الضوئي
at reflection	عند الانعكاس
multiple-beam	الأشعة متعددة
sharpness	حدة
two-beam	هذب التداخل الضوئي الثنائي
applied to fibre surface topography	لدراسة تضاريس سطح الألياف
spliced optical fibres	الألياف البصرية الموصولة
Interference in crystals	التداخل الضوئي في البلورات

Interference microscope	ميكروسكوب التداخل الضوئي
automated	ميكروسكوب التداخل الضوئي ذات التحكم الأتوماتيكي
Baker	ميكروسكوب التداخل الضوئي لبكر
Dyson	ميكروسكوب التداخل الضوئي لدایسون
Interphako	ميكروسكوب التداخل الضوئي (انترفاكو)
Leitz	ميكروسكوب التداخل الضوئي (ليتز)
Linnik	ميكروسكوب التداخل الضوئي (لينيك)
Pluta	ميكروسكوب التداخل الضوئي لبلوتا
Polarising	ميكروسكوب التداخل الضوئي المستقطب
Shearing effect	ازدواج الصورة في ميكروسكوب التداخل الضوئي
Tolansky	ميكروسكوب التداخل الضوئي لتولانسكي
two-beam	الثنائي
two-beam single-pass	أحادي المسار
variable double refracting (VDRI)	انكسار مزدوج متغير
Zeiss-Linnik	ميكروسكوب التداخل الضوئي (زايس لينيك)
Interference of plane polarised light	تداخل الأشعة المستقطبة في مستوى
Interference pattern	هدب التداخل الضوئي
Interferograms	صور التداخل الضوئي
analysis	تحليل صور التداخل الضوئي
automated analysis	تحليل صور التداخل الضوئي أتوماتيكيا
Interferometer	مقياس التداخل الضوئي
double-pass	ثنائية المسار
Fabry-Perot	لفابري وبيروت
Jamin	لجامن
Mach-Zehnder	لماخ وزندر
Michleson	ميكلسون
Single-pass	أحادي المسار

wedge	على شكل إسفين
Interferometric slab method	التداخل الضوئي باستخدام شريحة على شكل قرص
accuracy	دقة
Interferometry	التداخل الضوئي
differential	التفاضلي
fibre	ألياف
holographic	هولوغرافي
speckle	بقيعات ضوئية
substraction	التداخل الضوئي بالطرح
Irradiation effect, γ on refractive index of	تأثير التشعيع بأشعة جاما
optical fibre	ألياف بصرية
synthetic fibre	ألياف تركيبية
Isotropic homogeneous medium	وسط متجانس ومتماثل ضوئيا
Kevlar 49 fibres	ألياف الكفلار ٤٩
Laser	ليزر
He-Ne	ليزر الهيليوم - نيون
injection	ليزر الحقن
Lateral birefringence of fibres	الانكسار المزودج الجانبي للألياف
Light emitting diodes (LED)	ثنائي باعث الضوء
Lorentz-Lorenz expression	صيغة لورنتز - لورنز
Matching cell	خلية تحوي سائل معامل انكساره مساو لمعامل انكسار قشرة الشعيرة
Mechanical anisotropy	التباين في الخواص الميكانيكية
Mica	ميكا
muscovite	مسكوفيت ميكا
phlogopite	فلوجوباييت ميكا
surface topography	تضاريس سطح الميكا

Microstrain device	جهاز لقياس الشد الضئيل
Modified chemical vapour deposition (MCVD)	الطريقة الكيميائية المعدلة لتحضير الألياف بترسيب الأبخرة
Mohair wool fibres	ألياف صوف الموهير
Multilayer coating	الطلاء بعدة طبقات
Multiple-beam	تطبيق طرق التداخل الضوئي المتعدد
applied to surface topography	تطبيق دراسة تضاريس السطح
in transmission	عند النفاذ
at reflection	وعند الانعكاس
Fizeau experimental arrangement for formation	النظام البصري المستخدم للحصول على هدب التداخل الضوئي
in transmission	عند النفاذ
at reflection	عند الانعكاس
Fizeau fringes	هدب التداخل الضوئي المتعدد للفيزو
intensity distribution	توزيع الشدة الضوئية
interference	التداخل
interference fringes	هدب التداخل الضوئي
Localised interference systems	أنظمة التداخل الضوئي التي تنتج محددة الموقع
reflected system	هدب التداخل الضوئي المتعدد الناتجة بالانعكاس
Natural fibres	ألياف طبيعية
Newton's rings	حلقات نيوتن
Non-destructive technique	الطريقة (غير المظلة) اللاإتلافية
Numerical aperture (NA)	الاتساع العددي
Nylon 6	نايلون ٦
Nylon 66	نايلون ٦٦
Object	جسم

amplitude	جسم يغير سعة الموجة
phase	جسم يغير طور الموجة
Optical absorption	امتصاص ضوئي
Optical anisotropy	تباين ضوئي
Cotton	ألياف القطن
Optical communication systems	نظم التواصل الضوئي
Optical fibres	ألياف بصرية
calculation of index profile	حساب برقيل معامل الانكسار
effect of γ -irradiation	تأثير التشعيع بئشعة جاما
	برقيل ألياف بصرية معامل انكسار ليها يقل
graded index	مع البعد عن مركز الشعيرة
	بروقيل معامل الانكسار للألياف البصرية
graded index profile	متدرجة معامل الانكسار
monomode	الانكسار - وحيدة المنوال
multimode	عديدة المنوال
optical properties	الخصائص الضوئية
refractive index measurement	قياس معامل الانكسار
refractive index profile	بروقيل معامل الانكسار
single mode	وحيدة المنوال
step index	بروقيل معامل الانكسار من درجة واحدة
waveguides	موجه الموجة
Optical Fourier transforms	تحويلات فوريير الضوئية
Optical microscopy	الميكروسكوب الضوئي
Optical path length	طول المسار الضوئي
Optical waveguides	موجهات الموجات الضوئية
Opto-mechanical properties of fibres	الخصائص الضوئية - الميكانيكية للألياف
Opto-thermal properties of fibres	الخصائص الضوئية - الحرارية للألياف
Phase change in transmission	تغير طور الأشعة عند نفاذها

Phase change on reflection	تغير طور الأشعة عند انعكاسها
Phlogopite mica	ميكا الفلوجوبييت
Photodetectors	كواشف ضوئية
Picture analysis	تحليل الصورة
Planes of localisation	مستويات مواقع الهدب
Pluta microscope	ميكروسكوب التداخل الضوئي لبوتا
Polyester fibres	ألياف البولي استر
Polyethylene fibres	ألياف البولي إيثيلين
Polyethylene terephthalate fibres	ألياف البولي إيثيلين تيريفثاليت
Poly (p-phenylene terephthalamide)	ألياف البولي (ب فينيلين تيريفثاليميد)
Polypropylene fibres	ألياف البولي بروبيلين
Ramie fibres	ألياف الرامي
Rayleigh scattering	تشتت رالي
Rayleigh's refractometer	مقياس معامل الانكسار لرالي
Reconstruction of wavefront	إعادة بناء جبهة الموجة
Refractive index	معامل الانكسار
accuracy of the measurement	الدقة في درجة القياس
measurement	قياس
profile of fibres	بروفيل معامل انكسار الألياف
variation	تغير معامل الانكسار
Scanning electron microscope	الميكروسكوب الإلكتروني الماسح
Scanning microdensitometer	جهاز قياس الشدة الضوئية
Scattering (see Back-Scattering)	التشتت الخلفي
Rayleigh	تشتت رالي
Skin of fibres	قشرة الشعيرات
Snell's law	قانون سنيل
Speckle	البقعيات الضوئية
Speckle interferometry	التداخل الضوئي الناتج من البقعيات الضوئية

double exposure	ثنائية التعريض
Speckle photography	التسجيل الفوتوغرافي للبقيعات الضوئية
double exposure	ثنائية التعريض
Spectrograph	المطياف
dispersion	التفرق الضوئي للمطياف
magnification	تكبير المطياف
Splices	لحام
Splicing process	عملية اللحام
examine quality	فحص جودة طريقة اللحام
Storage of the image	تخزين الصورة
Structure of fibre, method	تركيب الألياف
synthetic	التركيبية
optical	الضوئية
Surface features	خصائص السطح
Surface of localisation	أسطح مواقع الهدف
Surface topography	تضاريس السطح
crystal	لبلورات
fibres	للألياف
Synthetic fibres	الألياف التركيبية
Television microscope	الميكروسكوب التليفزيوني
Terylene fibres	ألياف التريلين
Twaron fibres	ألياف التاويرون
To-beam interference	تطبيق طرق التداخل الثنائي على الألياف
applied to fibres with irregular cross-sections	ذات المقاطع العرضية المنتظمة وغير المنتظمة
applied to fibres with regular cross-sections	
Uniaxial crystal	بلورة أحادية المحور البصري

Viscose rayon fibres

Visibility of fringes

relation to coherent length

Wollaston prism

wool fibres

Young's double-slit

Young's fringes

Zeiss-Linnik

Zero-order fringe

ألياف رايون الفسكوز

درجة تباين هدب التداخل وعلاقتها

بطول ترابط موجات المصدر

منشور ولاستون

ألياف الصوف

تجربة الشق المزدوج ل يونج

هدب التداخل الضوئي ل يونج

زايس - لننيك

الهبة الصفريّة

رقم الإيداع ٢٦٢٢-٩٣

الترقيم الدولي ٦-١٠٠٩٩-١٥-٩٧٧

مطابع الوفاء - المنصورة

شارع الإمام محمد عبده المجاورة لكلية الآداب

ت : ٣٤٢٧٢١ - ص.ب : ٢٣٠

تلكس : ٢٤٠٠٤ UN DWFA

المؤلفان

الأستاذ الدكتور نايل بركات

أستاذ الفيزياء التجريبية بكلية العلوم جامعة عين شمس ، كون مدرسة علمية في البصريات والطياف التطبيقية والليزر وبصريات الألياف . أقام وأشرف على وحدة المعايرة الضوئية للأطوال بالمعهد القومي للمعايرة . حصل على جائزة الدولة التشجيعية مرتين عامي ١٩٥٨ ، ١٩٦٣ وجائزة الدولة التقديرية عام ١٩٩٠ . له أكثر من تسعين بحثاً منشوراً في البصريات العالمية وحائز على وسام العلوم والفنون من الطبقة الأولى عام ١٩٥٩ ووسام الجمهورية من الطبقة الثالثة عام ١٩٥٦ ومن الطبقة الثانية عام ١٩٧٥ . شارك في تأليف هذا الكتاب باللغة الإنجليزية الذي ظهر في السلسلة الدولية في مجال البصريات والبصريات الإلكترونية عام ١٩٩٠ . زميل بمعهد الفيزياء بإنجلترا . حصل على درجة الدكتوراه في العلوم D. Sc. من جامعة لندن عام ١٩٩٢ .

الأستاذ الدكتور أحمد أمين حمزه

أستاذ الفيزياء ونائب رئيس جامعة المنصورة . له أكثر من ستين بحثاً منشوراً في البصريات العالمية . شارك في تأليف هذا الكتاب باللغة الإنجليزية الذي ظهر في السلسلة الدولية في مجال البصريات والبصريات الإلكترونية عام ١٩٩٠ . حصل على جائزة الدولة التشجيعية في العلوم الفيزيائية عام ١٩٨٧ وجائزة جامعة المنصورة الأساسية لعام ١٩٩١ . زميل بمعهد الفيزياء بإنجلترا و زميل الجمعية للميكروسكوب وعضو الجمعية الدولية للهندسة البصرية .



Adam Hilger
Bristol and New York

دار النشر للجامعات المصرية
مكتبة الوفاء

